

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Sistema integrado de balanceamento de linhas de produção na indústria do calçado

Marta Nilza de Carvalho Pereira da Fonseca

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica

Orientador na FEUP: José Soeiro Ferreira (Professor Doutor)

Orientador no INESC Porto: Rui Diogo Rebelo (Engenheiro)

Fevereiro 2011

Resumo

O balanceamento de linhas de produção assume nos dias de hoje uma relevância inquestionável, quer pelas necessárias alterações ao nível da produção industrial quer pela complexidade científica da sua resolução. O facto de a procura se ter alterado profundamente, tem um impacto significativo nas nossas indústrias.

Nas indústrias em geral, o paradigma da produção inverteu-se. Se anteriormente a procura implicava produção em massa de produtos standard em grandes quantidades, nos dias que correm a produção é feita em pequenas quantidades, de produtos customizados. Na indústria do calçado esta alteração significa no limite, a produção ao par.

Consequentemente, os sistemas produtivos já implementados devem ser adaptados de forma a conseguirem dar resposta à procura actual. As linhas de produção devem ser flexíveis e devem estar correctamente balanceadas de forma a que a produção de vários modelos em simultâneo seja efectuada de forma eficiente.

O caso em estudo apoia-se muito directamente numa empresa piloto, focando-se a dissertação no desenvolvimento de um sistema base de balanceamento de linhas de produção capaz de lidar com a produção simultânea de uma maior variedade de modelos em pequenas quantidades. Um objectivo final seria a sua integração em ambiente da empresa.

Para tal, e atendendo à limitação da curta duração do projecto de âmbito industrial, foi decidido desenvolver e implementar uma heurística adequada ao problema do balanceamento das linhas de produção e também incluir, em paralelo, modelos de optimização para consolidação de opções feitas e para facilitar alguma prossecução do trabalho realizado.

As soluções obtidas através da heurística e da optimização matemática do problema foram submetidas a simulação. A ferramenta utilizada para efectuar a simulação foi também ela desenvolvida no âmbito do projecto, e representa o funcionamento do transportador existente na empresa piloto, visto que este tem um algoritmo próprio de gestão de movimentação de caixas entre postos.

Como resultado final deste projecto surge uma ferramenta que poderá ser interligada ao sistema já existente, e que no estado actual representa ainda uma ferramenta de apoio ao balanceamento da linha de produção.

Abstract

The Assembly line balancing, represents nowadays an unquestionable relevance, whether for the necessary changes at production level whether for the scientific complexity of its resolution. The fact that demand has been changing profoundly, has a significant impact on our industries.

In industries in general, the production paradigm has reversed. If demand previously implied mass production of standard products in big quantities, nowadays the production is done in small quantities, of customized products. In footwear industry this change means at the most, pair production.

Consequently, the productive systems already implemented should be adapted in order to be able to deal with actual demand. Assembly lines should be flexible and must be correctly balanced so that the production of various models may be efficiently executed simultaneously.

The focus of this dissertation concerns the development of an assembly line balancing system capable of dealing with the simultaneous production of a larger variety of models in small quantities. This study is based on a pilot company. From this study was developed a system which is intended to be integrated with the company's existing system.

In order to do so, and considering the limitations in what concerns the short duration of the project, it was decided to develop and implement an adequate heuristic for the balancing of the Assembly lines and simultaneously include optimization models for consolidation of the options taken and to ease the accomplishment of the work done.

The solutions obtained from the heuristic and from the mathematical optimization of the problem were submitted to simulation. The tool used to perform the simulation was also developed in the scope of the project and represents the functioning of the existing conveyor in the pilot company, since it has its own algorithm for managing the movement of the boxes between the posts.

As a final result of this project there is a tool that may be interconnected to the already existing system, and in the present state also represents a supporting tool to the assembly line balancing.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor José Soeiro Ferreira, por todo o empenho, disponibilidade e apoio que me dedicou enquanto meu orientador científico. Gostaria também de agradecer ao Engenheiro Rui Diogo Rebelo, pela oportunidade, dedicação e apoio incondicional. Ao Nicolau Santos, meu colega de trabalho, obrigada por tudo o que fez por mim.

Agradeço ao INESC Porto pela oportunidade, condições de trabalho que me proporcionou e pelo ambiente fantástico que possibilita.

Aos meus pais, irmão e sobrinho por independentemente das minhas decisões, me terem apoiado sempre e por fazerem de mim o que sou. Um obrigada também a todos os elementos da minha família que se alegram com o que de bom alcanço.

Ao Bernardo Rocha por todo carinho, amizade e apoio que me deu durante toda a execução desta dissertação o meu sincero obrigada.

Ao Luís, Inês, Paula, Pipa, Rui, Niki, Valganti por me terem dado força e amizade sempre que precisei, e até mesmo quando não.

A todos os meus colegas e Amigos da FEUP, que acompanharam o meu percurso e que de alguma forma contribuíram para que alcançasse com sucesso o fim desta etapa da minha vida.

A todos os meus colegas e Amigos do INESC Porto em especial os com quem lidei de forma mais próxima durante estes 6 meses por me terem feito acordar com vontade de ir trabalhar todos os dias.

Marta Nilza de Carvalho Pereira da Fonseca

*“Bendito seja eu por tudo o que não sei.
Gozo tudo isso como quem sabe que há o sol.”*

Fernando Pessoa (Alberto Caeiro)

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	A Entidade acolhedora	2
1.2	Motivação para a execução do projecto	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Linhas de produção	7
2.1	Linhas de produção	7
2.2	Balanceamento de Linhas de Produção	8
2.2.1	Descrição do SALB:	9
2.2.2	Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de produção	11
2.2.3	Análise de Métodos de resolução já utilizados:	16
2.3	Resumo	17
3	Caso em Estudo	19
3.1	Caracterização e Estruturação	19
3.2	Produção na indústria do calçado	19
3.3	Encomendas e planeamento de produção	20
3.4	Gamas operatórias	22
3.5	Recursos	22
3.6	Método de balanceamento actual	24
3.7	Objectivo	24
4	Abordagem e resolução	27
4.1	Descrição das heurísticas	27
4.1.1	Processamento de dados	28
4.1.2	Heurística de associação de carga de trabalho por operador e posto	30
4.1.3	Heurística de distribuição das operações pelos operadores	31
4.1.4	Solução	33
4.2	Modelação matemática	34
4.2.1	Modelação matemática	34
4.2.2	Modelo matemático 1	35
4.2.3	Modelo matemático 2	36
4.2.4	Programação matemática do modelo 1	37
4.2.5	Programação matemática do modelo 2	39
5	Simulação e Discussão de resultados	41
5.1	Simulador	41
5.1.1	Algoritmo do transportador	41

5.1.2	Algoritmo do transportador - envio rápido	42
5.2	Cenários e simulação	42
5.2.1	Cenário 1	42
5.2.2	Cenário 2	45
5.2.3	Pressupostos e factores relevantes para o balanceamento	46
5.2.4	Simulação do Cenário 1	46
5.2.5	Simulação do Cenário 2	60
5.2.6	Discussão dos resultados das simulações	63
6	Conclusões e Trabalho Futuro	65
6.1	Conclusão	65
6.2	Trabalho Futuro	66
A	Programação matemática	69
A.1	Código do modelo 1	69
A.2	Código do modelo 2	70
B	Resultados das simulações	71
	Referências	87

Lista de Figuras

1.1	Nuvem de palavras do conteúdo da dissertação	2
3.1	Mapa mental do problema	20
3.2	Representação do layout do transportador	23
3.3	Descrição do problema	24
3.4	Diagrama descritivo das entradas e saídas esperadas do sistema de balanceamento	25
4.1	Sequência das heurísticas	28
4.2	Heurística de associação de carga de trabalho por operador e posto	32
4.3	Heurística de distribuição das operações pelos operadores	33
4.4	Modelação matemática	34
5.1	Algoritmo do transportador	43
5.2	Algoritmo do transportador - Envio rápido	44
5.3	Simulação do cenário 1 - Heurística 1	48
5.4	Simulação do cenário 1 - Heurística 2	48
5.5	Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 1	49
5.6	Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 2	50
5.7	Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 1	51
5.8	Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 2	52
5.9	Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 1	53
5.10	Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 2	53
5.11	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 1	54
5.12	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 2	55
5.13	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 1	56
5.14	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 2	57
5.15	Simulação do cenário 1 com n° teorico de postos necessários - Heurística 1	58
5.16	Simulação do cenário 1 com n° teorico de postos necessários - Heurística 2	58
5.17	Simulação do cenário 1 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes	59
5.18	Simulação do cenário 2	61
5.19	Simulação do cenário 2 com mais polivalência	62
5.20	Simulação do cenário 2 com n° teórico de postos	63
5.21	Simulação do cenário 2 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes	64

Lista de Tabelas

2.1	Versões do SALBP	10
4.1	Número de postos	28
4.2	Número de operadores	29
4.3	Gamas operatórias	29
4.4	Número de pares que é necessário produzir por gama	29
4.5	Necessidade de tempo de execução por cada super-operação	30
4.6	Sequência das heurísticas	31
4.7	Valores para a variável i - operadores	38
4.8	Valores para a variável j - postos	38
4.9	Valores para a variável k - operações	38
4.10	Parâmetro t - tempo de execução necessário por operação	38
4.11	Parâmetro td - tempo disponível por operador	38
4.12	Valores da variável w - associação operador/posto/operação	38
4.13	Resultados obtidos do modelo 1	38
4.14	Dados para teste de modelo 2	39
4.15	Resultados obtidos do modelo 2	40
5.1	Operações	44
5.2	Número de postos	44
5.3	Número de operadores	45
5.4	Gamas operatórias	45
5.5	Quantidade por gama operatória	45
5.6	Resultados obtidos na simulação do cenário 1	60
B.1	Simulação do cenário 1 - Heurística 1	71
B.2	Simulação do cenário 1 - Heurística 2	72
B.3	Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 1	73
B.4	Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 2	74
B.5	Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 1	75
B.6	Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 2	76
B.7	Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 1	77
B.8	Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 2	78
B.9	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 1	79
B.10	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 2	80
B.11	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 1	81
B.12	Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 2	82
B.13	Simulação do cenário 1 com nº teorico de postos necessários - Heurística 1	83
B.14	Simulação do cenário 1 com nº teorico de postos necessários - Heurística 2	84

B.15 Simulação do cenário 1 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes	85
---	----

Abreviaturas e Símbolos

ALB	<i>Assembly Line Balancing</i>
ALBP	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
GALBP	<i>General Assembly Line Balancing Problem</i>
GLPK	<i>GNU Linear Programming Kit</i>
LPT	<i>Longest Processing Time</i>
MALBP	<i>Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem</i>
MSP	<i>Mixed-Model Sequencing Problem</i>
SALBP	<i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>

Capítulo 1

Introdução

A dissertação sistema integrado de balanceamento de linhas de produção na indústria do calçado apoia-se num projecto a ser desenvolvido no INESC Porto na área de automação e logística interna.

Devido à alteração do tipo de procura, as indústrias têm necessidade de fazer alterações ao seu sistema produtivo, de forma a conseguirem dar resposta às exigências do mercado e a manterem-se competitivas. Torna-se necessário desenvolver sistemas produtivos mais ágeis e que consigam gerir a elevada variedade de modelos a ser produzidos em simultâneo em pequenas quantidades. Os sistemas têm de ser flexíveis e têm de ser correctamente balanceados, de forma a que exista o menor desperdício possível de tempo de trabalho, *stocks* intermédios, os prazos sejam cumpridos e a procura seja satisfeita sem custos adicionais.

O balanceamento de uma linha de produção consiste na afectação de operações a postos de forma a que a linha se encontre equilibrada existindo assim fluxo na produção e que o tempo total de não trabalho seja o mínimo possível.

O sistema de balanceamento de linhas de produção a desenvolver terá como base uma empresa piloto em crescimento contínuo desde o seu surgimento, e na qual o balanceamento é feito já com as encomendas em produção de forma reactiva e com base na experiência dos operadores que o efectuam.

A produção na indústria do calçado executa-se em 3 fases distintas: corte, costura e montagem. Este projecto prevê o balanceamento da linha de costura, onde se faz a costura de todo o tipo de sapato. Consoante o modelo, o tamanho e, a sequência e forma de executar, as operações diferem quer em tempo quer em recursos necessários. Este facto, juntamente com a complexidade da linha de produção e polivalência dos operadores, tornam este um problema de difícil caracterização.

Os objectivos subjacentes ao desenvolvimento do sistema:

- Levantamento e descrição detalhada do problema da empresa piloto;
- Conceptualização do sistema de balanceamento da linha de produção;
- Programação do sistema numa linguagem de programação;

- Simulação das soluções obtidas para diversos cenários representativos da realidade de produção da empresa piloto, que sustente o benefício da sua implementação e integração no sistema de gestão do sistema logístico para costura.



Figura 1.1: Nuvem de palavras do conteúdo da dissertação

A nuvem de palavras presente na Figura 1.1, obtida através da avaliação de todo o texto deste documento destaca, consoante a sua relevância e repetibilidade ao longo do mesmo, os termos que caracterizam todo o problema, métodos, abordagens de resolução e conclusões deste projecto.

As principais contribuições deste trabalho são a modelação matemática do problema em estudo, um sistema de balanceamento de linhas de produção que integra duas heurísticas, que além de efectuar o balanceamento serve também como ferramenta de apoio à decisão para a empresa em questão visto que integra também um simulador desenvolvido especificamente para representar o comportamento do sistema de gestão logística já instalado na empresa.

1.1 A Entidade acolhedora

Esta tese foi desenvolvida no INESC Porto - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto no âmbito de um IDT do QREN em copromoção com a FLOWMAT, INESC Porto e CTCP. O INESC Porto é uma associação privada sem fins lucrativos, constituída a 18 de Dezembro de 1998 e cujos associados fundadores são o INESC e a FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O INESC Porto é reconhecido como Instituição de Utilidade Pública e adquiriu em 2002 o estatuto de Laboratório Associado.

O INESC Porto, tem várias áreas de intervenção, segundo as quais foram formadas as seguintes unidades:

- UESP - Unidade de engenharia e sistemas de produção;
- UITT – Unidade de Inovação e transferência de tecnologia;
- UOSE – Unidade de optoelectrónica e sistemas electrónicos;
- USE – Unidade de sistemas de energia;
- USIG – Unidade de informação e computação gráfica;
- UTM – Unidade de telecomunicações e multimédia;
- Robis – Robótica e sistemas inteligentes.

O INESC Porto é uma instituição criada para constituir uma interface entre o mundo académico e o mundo empresarial da indústria e dos serviços, bem como a administração pública, no âmbito das Tecnologias de Informação, Telecomunicações e Electrónica, sendo actualmente desenvolvidas no INESC actividades de investigação e desenvolvimento, consultoria, formação avançada e transferência de tecnologia nas áreas de Telecomunicações e Multimédia, Sistemas de Energia, Sistemas de Produção, Sistemas de Informação e Comunicação e Optoelectrónica.

Os seus objectivos estratégicos são:

- Produzir ciência e tecnologia competitiva, tanto nacional como internacionalmente;
- Colaborar na formação de recursos humanos, a nível científico e tecnológico apostar nas capacidades nacionais e com o objectivo de contribuir para amodernização do país;
- Contribuir para a evolução do ensino científico e tecnológico direccionando-o para a satisfação das necessidades do tecido económico social;
- Promover, facilitar e incubar iniciativas empresariais por parte dos seus jovens investigadores, que valorizem as actividades de Investigação e Desenvolvimento desenvolvidas no INESC Porto;

O que o INESC Porto pretende com a realização dos objectivos anteriores é a contribuição para um país moderno, uma sociedade de qualidade e uma economia sólida.

1.2 Motivação para a execução do projecto

A UESP, tem também algumas áreas de intervenção, das quais se destaca a área de Automação e Logística Interna, por ser a área em que este projecto se enquadra.

Esta área iniciou os projectos na indústria do calçado, em 1995 com o projecto FACAP (Fábrica de sapatos do futuro). A este projecto seguiram-se SABE (*Balancing/Scheduling Support System*), EUROShoe (*Tools for the extended user oriented shoe enterprise*), FATEC (*High technology for Shoe*), CICLOP (*Computerized and Integrated Closing Operation*), CEC-made-shoe (*Custom, Environment and Comfort made shoe*), SAPIR (*Support System to Integrated Planning for Shoe*

Production Networks), SIMULOG(*Simulation and Operation of Internal Logistic Systems*), AGIL-PLAN(*Agile System for Network Planning for shoe Industry*), e finalmente em 2010 os projectos ShoeID, Fit4u (*Framework of Integrated Technologies for User Centered Products*) e SIBAP, sendo este último o projecto sobre o qual se desenvolveu esta dissertação.

O problema em questão consiste no desenvolvimento de um sistema integrado para balanceamento de linhas de produção para a indústria do calçado. Inicialmente foram desenvolvidas linhas de produção condizentes com a procura, ou seja para produção em massa. Neste tipo de produção, orientada ao fluxo, os postos estão alinhados em série. As peças de trabalho são lançadas para a linha de forma contínua e passam por todos os postos sendo nestes executadas operações até o produto estar terminado. Nestas linhas, os postos estão interligados por um qualquer sistema de transporte, normalmente um tapete rolante.

Actualmente, os mercados são mais exigentes, a procura levou à produção de uma maior variedade de modelos em quantidades mais reduzidas. O novo paradigma da produção baseia-se no baixo volume de grande variedade de modelos o que obriga à agilização e flexibilidade dos sistemas produtivos. Esta flexibilidade do sistema produtivo consegue-se através da adopção de linhas de produção capazes de produzir alternada ou simultaneamente modelos distintos com reduzidas implicações na eficiência do sistema produtivo.

A motivação para a execução deste trabalho advém do facto de este reflectir um problema que atinge não só a empresa em questão, mas também algumas empresas que se encontram a modificar o seu sistema produtivo para conseguir satisfazer as suas necessidades produtivas, e para o qual uma solução traria inúmeros benefícios. Existe também um factor motivador que se prende com o facto de o problema de balanceamento de linhas de produção ter grande foco no mundo científico por ser tão vasto e complexo.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente capítulo, Capítulo 1, contém uma breve descrição do problema abordado nesta dissertação. É neste capítulo também que se encontram definidos os objectivos a atingir neste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos e noções sobre linhas de produção e sobre o seu balanceamento. É também feito um levantamento de modelos existentes, e estudado os problemas de balanceamento de linhas de produção e dos métodos usados na sua resolução.

No Capítulo 3 é apresentado o problema em estudo nesta dissertação tal como a metodologia usada para efectuar o levantamento do mesmo, dada a sua elevada extensão.

O Capítulo 4 refere-se às duas abordagens de resolução adoptadas, fazendo a descrição do modelo matemático e da heurística desenvolvida. É também apresentado um pequeno exemplo demonstrativo do funcionamento da heurística.

O Capítulo 5 contém as simulações da heurística, e comparação dos resultados obtidos pela heurística e pelo modelo matemático o qual foi sujeito a programação matemática. Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos.

Por ultimo, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, e levantadas as questões sobre as quais seria interessante efectuar trabalho futuro.

Capítulo 2

Linhas de produção

Este capítulo contém uma introdução às linhas de produção e aos conceitos fundamentais associados, bem como é apresentada uma revisão bibliográfica que suporta o desenvolvimento deste documento. Estão presentes algumas definições e conceitos referentes a linhas de produção, sendo posteriormente abordado o problema de balanceamento de linhas de produção. Numa primeira fase é descrito o problema básico, e mais estudado, de balanceamento de linhas de produção (SALBP) pois este levanta as principais questões a ter em consideração na resolução de um problema deste tipo, e é posteriormente efectuada uma revisão sobre a classificação dos ALBP. Por fim é feito um levantamento das abordagens de resolução do modelo que foi entendido como o mais próximo do problema sobre o qual se desenvolveu esta dissertação.

2.1 Linhas de produção

Uma linha de produção consiste num conjunto de postos de trabalho, [1] colocados de forma sequencial e interligados por algum meio de transporte, usualmente um tapete rolante. Tipicamente os postos encontram-se dispostos para que os produtos fluam ao longo da linha, sendo neles executadas as operações necessárias, em cada posto. Ao conjunto de operações executadas no produto na sequência correcta de execução, dá-se o nome de gama operatória.

As linhas de produção podem ser categorizadas em 3 tipos de linha, em função do número de modelos que nela se produz. Se numa linha de produção se produzir um único modelo, poderemos classificar a linha como linha de produção de modelo único (SALB – Single model Assembly Line). Se numa linha de produção se produzem vários modelos simultaneamente, a linha será classificada como linha de produção mista (MMAL – Mixed Model Assembly Line). Por último, se numa linha de produção estiver preparada para produzir vários modelos, mas a inserção dos produtos na linha for feita de forma a que, na mesma, circule exclusivamente um modelo, estamos na presença de uma linha de produção múltipla (MUAL – Multi-model Assembly Line) [2].

Um posto de trabalho representa o local onde se executam operações e pode consistir numa máquina, um conjunto de máquinas, um ser humano, um conjunto de ser humanos, um par máquina-operador, etc..

Gama operatória é um conjunto de operações, que devem ser executadas para se obter um produto acabado. Na gama operatória, além da definição das operações a executar e do tempo de processamento de cada operação, está também definida a ordem na qual as operações devem ser executadas, ou seja, a sua relação de precedência. As relações de precedência são tipicamente representadas através de um grafo ou diagrama de precedências, no qual os nós representam as operações, e os arcos que os unem as relações de precedência, ou seja, um arco que una o nó i ao nó j , indica que a operação j só pode ser realizada quando a operação i estiver concluída. As relações de precedência significam portanto restrições do processo produtivo.

As operações devem ser distribuídas pelos postos que compõem a linha de produção de forma a que todas sejam executadas e que as relações de precedência, definidas nas gamas operatórias, sejam respeitadas. No caso de se tratar de uma linha de produção de modelo único, o planeamento da linha é efectuado apenas uma vez, mantendo-se o mesmo enquanto se estiver a produzir o mesmo modelo. No caso de uma linha de produção múltipla, devem ser efectuadas alterações sempre que se muda de modelo em produção; estas alterações tanto podem implicar apenas alteração de ferramentas em algumas máquinas, como implicar alterações morosas e complexas no caso de alteração da distribuição das operações pelos postos, ou até mesmo da ordem dos postos. Quanto a linhas de produção mistas, dado o tipo de produção, devem estar preparadas para que a produção se desenrole sem alterações muito significativas, ou muito profundas sem que existam grandes perdas de produtividade.

Para cada produto distinto existe um tempo total de trabalho necessário para a sua produção. O tempo total de trabalho é a soma do tempo de processamento de cada operação que compõe a gama operatória de um produto.

A soma dos tempos de processamento das operações que se realizam num posto, representa o tempo de trabalho desse mesmo posto. Os itens a produzir são inseridos no início da linha, com um intervalo de tempo que não deverá nunca ser inferior ao maior tempo de trabalho de todos os postos da linha, para que seja possível concluir todas as operações em cada um dos postos. Se estivermos na presença de uma linha de produção de modelo único, visto que o tempo de trabalho dos diferentes postos se mantém constante, o intervalo de tempo entre a introdução de dois itens na linha, é constante, e define-se como o tempo de ciclo da linha de produção. Consequentemente, podemos também assumir que o tempo de ciclo representa o intervalo de tempo que existe entre a saída de 2 artigos consecutivos, da linha de produção. Ao inverso do tempo de ciclo dá-se o nome de taxa de produção da linha de produção.

2.2 Balanceamento de Linhas de Produção

Ao acto de distribuir operações pelos postos de trabalho, optimizando um determinado objectivo e respeitando as restrições existentes, dá-se o nome de balanceamento de linha de produção.

Se ao efectuar a distribuição das operações pelos postos, estes tiverem tempos de trabalho iguais, podemos afirmar que a linha de produção se encontra perfeitamente balanceada. Dadas as condicionantes habituais de uma linha de produção real, esta situação raramente ocorre.

A configuração de um linha de produção [3] deve ser bem estudada e ter em conta vários factores visto que normalmente implica um grande investimento. A (re)-configuração de uma linha de produção tem portanto, elevada importância na implementação de um sistema produtivo eficiente. O seu planeamento deve envolver todas as operações de decisões relacionadas com o processo produtivo.

A primeira formulação matemática efectuada foi em 1955 por Salveson e foi apelidado de SALB (Simple Assembly Line Balancing) pois o modelo em questão assume várias simplificações em relação ao que na realidade acontece. Foram posteriormente efectuados vários estudos, que visam representar as linhas de produção existentes, tais como as linhas em U, linhas paralelas, etc.. A estes modelos[4], que representam, alguma variação do modelo SALB, dá-se o nome de GALB (General Assembly Line Balancing). Mesmo assim e apesar dos inúmeros esforços, continua a existir uma lacuna entre os estudos científicos e a aplicação prática.

Para esta lacuna existente entre os estudos científicos e a aplicação prática existem três razões teóricas que a podem explicar [5]. A primeira prende-se com o facto de os investigadores não considerarem os problemas reais para os seus estudos, a segunda deriva dos resultados não satisfatórios mesmo quando o problema foi bem representado e por fim a terceira razão, que advém da dificuldade que existe em transferir os resultados do estudo científico para a sua aplicação real. Qualquer destas razões resulta de um problema de comunicação que se reflecte pela inconsistência existente nas terminologias e definições. Esta inconsistência não só impede a comunicação entre a comunidade de investigação como também a passagem de conhecimento para a prática.

2.2.1 Descrição do SALB:

Na família dos problemas de balanceamento de linhas de produção (ALB) o mais conhecido e estudado é o SALB (Simple Assembly Line Balancing). Embora esteja longe de reflectir a complexidade do mundo real, levanta as principais questões[6]. A maior parte dos problemas gerais de balanceamento de linhas de produção são extensões do SALB.

Segundo a formulação do SALB, uma linha de produção consiste num conjunto $k=1, \dots, m$ de estações de trabalho, dispostas ao longo de um tapete rolante, ou algum mecanismo de transporte de material. As peças de trabalho são lançadas consecutivamente para a linha e movidas de estação de trabalho para estação de trabalho até ao fim da linha. Um certo grupo de operações é repetidamente executado em cada peça de trabalho que entra numa estação de trabalho, sendo que ao espaço de tempo entre duas entradas de peças de trabalho numa estação se dá o nome de tempo de ciclo. O problema de balanceamento de linhas de produção consiste na distribuição de forma óptima, das operações pelos postos de trabalho respeitando um certo objectivo. As operações representam então unidades indivisíveis de trabalho e cada operação j tem um tempo de execução

tj. Devido a requisitos tecnológicos ou organizacionais, as tarefas estão sujeitas a restrições de precedência. Estas podem ser representadas por um grafo de precedências.

O balanceamento de linha consiste na associação de operações a estações de trabalho, de forma a que nenhuma relação de precedência seja violada. O conjunto de operações associadas a uma estação de trabalho k constitui a sua carga de trabalho. A soma dos tempos de execução das operações dá-se o nome de tempo de posto.

No SALB é assumido que existe tempo de ciclo e este tem um valor constante C . Às linhas de produção que têm esta característica, dá-se o nome de *paced* pois a entrada das peças de trabalho em produção é “ritmada”, tal como a sua passagem de posto para posto, que se faz a essa mesma taxa. De forma a que o balanceamento seja aceitável, é necessário garantir que o tempo de trabalho em cada posto não excede o tempo de ciclo, no entanto poderá ser inferior. Sendo inferior, ao tempo de não produção dá-se o nome de tempo ocioso. O tempo ocioso deve ser tão pequeno quanto possível para se obter uma linha de produção altamente produtiva.

O SALBP (Simple Assembly Line Balancing Problem) [7] pode ser desdobrado em quatro versões em função do seu objectivo:

Tabela 2.1: Versões do SALBP

Versões do SALBP		Tempo de ciclo	
		Atribuído	Minimizar
Nº de postos	Atribuído	SALBP-F	SALBP-2
	Minimizar	SALBP-1	SALBP-E

O SALBP-1 tem como objectivo a minimização do número de postos para um dado tempo de ciclo, o SALBP- 2 tem como objectivo a minimização o tempo de ciclo para um número fixo de postos de trabalho, o SALBP-F procura encontrar uma solução factível para o caso em que o tempo de ciclo é conhecido e o número de postos é fixo e finalmente, o SALBP-E em que o objectivo é encontrar uma solução factível minimizando tanto o número de postos, como o tempo de ciclo. Independentemente da versão, o SALBP baseia-se no seguinte conjunto de características[6]:

Independentemente da versão, o SALBP baseia-se no seguinte conjunto de pressupostos:

- Produção em massa de um único produto;
- Todas as operações são executadas de um modo pré-definido;
- Linha do tipo *paced* com um tempo fixo de ciclo definido em função da quantidade de produto acabado desejado;
- Linha de produção em série;
- A sequência de execução de operações depende das restrições de precedência;

- O tempo de execução das operações é determinístico;
- Não existem mais restrições de associação de operações a postos, se não as de precedência;
- As operações não são divisíveis por vários postos;
- Todos os postos se encontram igualmente equipados;

Em relação ao que se passa no mundo real, os pressupostos de que todas operações se realizam de forma pré-definida sem alternativas, e de que todos os postos se encontram equipados exactamente da mesma forma, representam as maiores simplificações.

De forma a se poder ter a variedade dos problemas de balanceamento de linhas de produção em conta, os pressupostos aceites para o SALBP, devem sofrer algumas alterações ou ser completamente excluídos. Segue-se portanto, um conjunto de pressupostos que devem constituir o ALBP (Assembly Line Balancing Problem) na sua generalidade:

- Os produtos a produzir (um ou mais) são bem conhecidos;
- Existe um conjunto de alternativas no processo produtivo;
- A linha deve ser configurada de forma a que a quantidade objectivo seja satisfeita numa determinada janela de tempo, o que pode ser realizado definindo um tempo (médio) de ciclo;
- O fluxo da linha é unidireccional;
- A sequência de execução de operações depende das restrições de precedência.

Comparando estes pressupostos com os pressupostos do SALBP, podemos concluir que os cinco primeiros pressupostos foram alterados, tornando-se menos específicos, e que os quatro restantes foram eliminados.

2.2.2 Classificação dos problemas de balanceamento de linhas de produção

Na tentativa de estruturar os ALBP's, foi desenvolvido [5] um esquema que propõe a sua classificação. Para os autores deste estudo, a classificação de um problema de balanceamento de linhas de produção tem três factores a ter em consideração:

1. características dos garfos de precedências;
2. características dos postos e das linhas;
3. objectivos do balanceamento.

2.2.2.1 Nas características dos grafos de precedências são tidos em consideração os seguintes aspectos:

- Grafos de precedência específicos do produto:
 - Considera as características do grafo de precedência consoante se trate de uma linha de modelo único, de múltiplos modelos ou modelos mistos, sendo que não se pode considerar crítico o número de modelos, mas sim o grau de homogeneidade entre os seus grafos de precedência;
- Estrutura dos grafos de precedência:
 - Este aspecto refere-se à estrutura do grafo, se ele tem alguma estrutura específica como por exemplo linear, convergente ou divergente, ou se tem uma qualquer estrutura acíclica;
- Tempos de processamento:
 - Dependendo do tipo de produto e de operação, os tempos de processamento das operações podem ser de diferentes tipos. Os tempos podem ser considerados estocásticos, ou seja, não são conhecidos os tempos de processamento; ou dinâmicos; se existirem variações nos tempos de processamento (estas variações podem ser originadas por exemplo pelo efeito de aprendizagem dos operadores, numa operação nova); ou por fim, tempos de processamento determinísticos que são considerados como conhecidos e estáticos;
- Acrescentos nos tempos das operações dependentes da sequência:
 - Estes acrescentos ocorrem sempre que a sequência das operações afecta o seu tempo de processamento. Pode ocorrer a situação em que duas operações são executadas no mesmo posto uma imediatamente depois da outra neste caso pode ser considerado acrescento de tempo devido a tempos de setup de alteração de ferramentas por exemplo. Pode também ser tido em consideração acrescentos de tempo indirectos, sendo que estes ocorrem se o estado adquirido, ao se completar uma tarefa, tem efeito no tempo de processamento de outras operações quer seja no mesmo, quer noutra posto de trabalho. Podem também não ser considerados acrescentos de tempo.
- Restrições de associação:
 - Para além das relações de precedência, existem mais restrições de associação que podem afectar a atribuição de operações a postos, forçando ou inibindo certas combinações. Restrições de associação podem surgir no caso de existirem subconjuntos de operações que estejam conectadas de tal forma que têm de ser associadas ao mesmo posto, ou quando a associação de operações a postos está sujeita a restrições de valores acumulativos de algum atributo desse mesmo posto (por exemplo, quando o espaço

para armazenar material é restrito). É também uma restrição de associação a obrigatoriedade de uma operação ser associada a um posto específico ou tipo de posto, tal como o não poder ser associada a um determinado tipo de posto. Quando na associação de operações a postos é tido em consideração o mínimo espaço ou tempo ou distâncias máximas (medidas em espaço ou tempo) entre operações estamos na presença de restrições de associação. Poderá existir o caso em que não é considerada qualquer restrição de associação.

- Alternativas no processo:
 - Se existem alternativas no processo, tanto o processo produtivo, como o grafo de precedências sofrem alterações, surgindo por isso um problema de decisão adicional: Existem casos em que as alternativas de processo podem ser distinguidas segundo os efeitos que provocam no grafo de precedência. Ou as alternativas de processo só tem consequência a nível dos tempos de processamento e de custos ou, não só atingem os tempos de processamento e custos, como também implicam alterações no grafo de precedências. Também podem ter como consequência as alternativas alterarem partes completas do processo produtivo, ou seja, criar subgrafos totalmente substituíveis.

2.2.2.2 Características dos postos e da linha:

- Movimentação de peças de trabalho:
 - Podem-se considerar linhas do tipo *paced*, em que um tempo de ciclo limita o tempo de operação do posto. Nesse caso, ou o conteúdo médio de trabalho de cada posto por ciclo em relação ao total de peças de trabalho está limitado pelo tempo de ciclo ou o tempo de ciclo é respeitado segundo uma determinada probabilidade ou proporção. Pode ainda existir o caso em que todos os postos e modelos devem respeitar um tempo de ciclo global ou em que são considerados tempos de ciclo locais, variando estes entre postos de trabalho e modelo.

Pode-se também considerar a existência de linhas *unpaced* que não se encontram restritas a um tempo de ciclo. Em vez de isso, o trabalho avança quando as operações anteriores são concluídas, ou num movimento assíncrono de peças de trabalho (assim que um posto termina uma operação, a peça de trabalho é movida para o próximo posto ou para um buffer.), ou num movimento síncrono de peças de trabalho em que o mesmo se faz de forma coordenada entre os postos (as peças de trabalho só passam para o postos seguinte quando todas as operações são concluídas em cada um dos postos)

- Layout da linha:

- Se os postos estão dispostos em série segundo o fluxo da linha ou dispostos em U. Neste último caso a linha pode formar um único U ou ser composta por vários segmentos de linha em forma de U.
- Paralelização:
 - Trata-se de paralelização quando é considerada mais do que uma linha a balancear, ou o número de linhas a ser instalado faz parte do problema de decisão, ou quando é considerado o uso de postos paralelos (assim como a sua capacidade é duplicada, as operações a si associadas podem ser desempenhadas alternadamente). É considerada também paralelização quando uma tarefa é assignada a mais do que um posto, adicionalmente às tarefas que lhe estão associadas (cada posto executa as operações paralelas, alternadamente), ou quando diversas operações são executadas na mesma peça de trabalho, simultaneamente, sem que existam perturbações entre elas. Existe a possibilidade de não se considerar qualquer tipo de paralelização.
- Associação de recursos:
 - Tipicamente, múltiplos recursos, tais como operadores, máquinas e ferramentas que conferem a um posto a possibilidade de executar as operações convenientemente. A associação de recurso acontece quando para cada posto existe a necessidade de escolher um equipamento num conjunto de equipamentos de diversos tipos, ou quando a associação dos equipamentos aos postos é efectuada em simultâneo com a associação de operações aos mesmos; Se várias operações necessitarem dos mesmos recursos, são criadas sinergias combinando as operações na mesma estação de trabalho. Existem os seguintes tipos de sinergias:
 - * Se mais do que uma operação pode ser executada pelo mesmo recurso (o investimento é reduzido se as operações forem executadas no mesmo posto, sendo o recurso instalado apenas uma vez);
 - * Se as operações diferem com a qualidade do recurso, tendo este de ser seleccionado de forma a que este garanta a execução do máximo de operações espectável;
 - * Se os recursos são modelados explicitamente para ter em conta outro tipo de sinergias e/ou dependência.
 - Pode existir a situação em que um recurso não é considerado explicitamente, no entanto pode influenciar as decisões de balanceamento através de restrições de associação, alternativas no processo, implicitamente.
- Acrescentos nos tempos das operações dependentes do posto:
 - Podem ser considerados acrescentos nos tempos das operações quando algum do tempo do posto é consumido por actividades não produtivas. Existe a possibilidade de não serem considerados acrescentos nos tempos das operações.

- Aspectos adicionais da configuração da linha de montagem:
 - Dependendo do sistema produtivo, requisitos adicionais podem e devem ser considerados aquando do balanceamento da linha. Existe o caso em que são necessários Buffers (armazenamentos intermédios, entre operações) e estes devem ser correctamente alocados e dimensionados), o caso em que uma ou mais linhas alimentam uma linha principal, tendo de ser tido em conta a coordenação de operações a executar, e o tempo de ciclo. Existe ainda o caso em que é necessário determinar a colocação e dimensão das caixas que contêm o material essencial para se efectuar a produção. É um aspecto adicional da configuração da linha de montagem quando a peça de trabalho tem estar posicionada de determinada forma, para que as operações possam ser executadas, e é necessário tomar uma decisão sobre que posições são fixas entre postos, ou se se deve alocar equipamentos especiais em determinados postos, para que a mudança de posição seja possível. Existe a possibilidade de não serem considerados aspectos adicionais no que diz à configuração da linha.

2.2.2.3 Objectivo do balanceamento:

- A optimização de um balanceamento de linha de produção deve ser efectuada segundo um objectivo, segundo o qual as soluções devem ser avaliadas. Existem porém casos em que a optimização é multi-objectivo, e então pode ser escolhido mais do que um objectivo do seguinte conjunto:
 - Minimização do número de postos de trabalho tendo em conta um determinado objectivo de produção, planeada para determinado horizonte temporal;
 - Minimização do tempo de ciclo para um número de postos fixo, ou seja maximizar a taxa de produção para um dado número de postos de trabalho;
 - Maximização da eficiência da linha (E) de forma a que as restrições associadas à taxa de produção e/ou número de postos sejam respeitadas;
 - Minimização dos custos para um output alvo de produção;
 - Maximização do lucro, sendo o lucro a diferença entre as receitas e os custos;
 - Além dos objectivos acima mencionados, os tempos dos postos de trabalho devem por vezes ser suavizados: ou quando se trata de produção do tipo modelos mistos, em que as variações causadas pela produção de diferentes modelos devem ser suavizadas ou quando os tempos dos postos são balanceados segundo todos os postos da linha(balanceamento vertical);
 - Maximização ou minimização do valor que esteja relacionado com um ou mais atributos que descrevam situações de bottleneck ou algum tipo de medida de eficiência;
 - Uma solução factível.

2.2.3 Análise de Métodos de resolução já utilizados:

Ao analisar esta classificação do problema de balanceamento de linhas de produção, podemos concluir que o problema em estudo é de produção de modelo misto, em linha unpaced, com estações paralelas e com restrições de associação cujos objectivos são encontrar uma solução factível e que maximize a taxa de ocupação dos operadores.

Pela revisão da literatura efectuada, não foi encontrado nenhum estudo até à data deste problema em específico. No entanto, foram analisados vários estudos de problemas que se aproximam de alguma forma do problema em questão e os seus métodos de resolução:

No problema de balanceamento de linhas de modelos mistos, o tempo de ciclo deixa de existir e passa a ser considerada a média dos tempos de operação em função de uma taxa de produção desejada[8]. Sugere-se então que os tempos dos postos sejam suavizados para cada posto. A esta suavização dá-se o nome de balanceamento horizontal[9].

Aliado ao MALBP deve estar o MSP (Mixed-Model Sequencing Problem), pois as melhores soluções conseguem-se quando além de efectuado o balanceamento, se procura a melhor sequência[10] de entrada em produção com um determinado objectivo[8].

Existem vários autores, tais como Thomopolous [11], McMullen and Frazier, 1997 [12] e Scholl, 1999 [13] que defendem a transformação do modelo MALBP em SALBP. Mesmo para uma solução óptima, considerando esta simplificação, podem ocorrer ineficiências consideráveis, quando a linha se encontra em funcionamento.

Melissa, Flávio e Sanson, 2007 [14] propõe uma metodologia para o balanceamento de linhas de produção de modelo misto em ambientes de customização em massa. A metodologia é uma heurística com vários passos. Em primeiro lugar é usado o método do diagrama equivalente [11], sendo posteriormente aplicado o algoritmo de Vilarinho e Simaria 2002 [15] para efectuar o balanceamento. Este algoritmo prevê a aplicação de uma heurística à qual se dá o nome de RPW (Rank Positional Weight). A partir desta heurística é obtida a solução inicial. Esta é alterada através de troca e transferência até se obter a solução final. Este algoritmo apresentou bons resultados, tendo aumentado a produtividade da linha em que foi implementada em 31%. Este algoritmo, embora eficiente não prevê as restrições de associação nem o facto da linha ser do tipo *unpaced*.

Ana Sofia Simaria e Pedro M. Vilarinho[16] sugerem para o problema de MALBP do tipo 2 (minimização do tempo de ciclo para um dado número de postos) duas abordagens: um modelo de programação matemática e um procedimento iterativo de algoritmos genéticos. Este procedimento conta em primeiro lugar com uma heurística construtiva para criar uma solução inicial factível aplicando depois os algoritmos genéticos. Este estudo baseia-se em linhas com postos paralelos e não prevê a polivalência de funcionários.

Os mesmos autores [17], sugerem para o MALBP, tipo 1 (minimização do número de postos para um dado tempo de ciclo) com a possibilidade de criação de postos paralelos, um algoritmo de optimização ant colony. Neste estudo os autores consideram restrições de precedência entre as operações, restrições de associação (apenas para forçar uma operação a ser executada num posto, ou o inverso, impedir que uma operação seja associada a determinado postos). Esta abordagem

também não pode ser usada para o caso em estudo pois, para além das questões referidas anteriormente, o número de operadores é fixo.

2.3 Resumo

Em suma, a extensa pesquisa bibliográfica realizada não permitiu descobrir qualquer publicação que versasse a situação industrial em estudo, nem mesmo permitiu identificar algum modelo de optimização que representasse razoavelmente as condicionantes, restrições e objectivos dos problemas enunciados nesta dissertação. Quanto a problemas do tipo MALBP foram encontradas várias abordagens de resolução que podem ser enquadradas em heurísticas, meta-heurísticas e métodos exactos.

Capítulo 3

Caso em Estudo

O caso em estudo é o de uma empresa na indústria do calçado. Nesta indústria a alteração da procura tem grande impacto e reflecte-se na produtividade das empresas, uma vez que as suas fábricas foram desenvolvidas para satisfazer a procura em massa. Existe por tanto uma crescente necessidade de adaptar o seu sistema produtivo por forma a manter-se no mercado de forma competitiva. Neste capítulo é efectuada em primeiro lugar, a apresentação da metodologia utilizada para elaborar o levantamento e desenho do problema. Esta metodologia justifica-se pela complexidade e dimensão do problema em estudo. Após apresentada a metodologia, é feita a descrição de todo o problema e o seu enquadramento no processo produtivo da empresa.

3.1 Caracterização e Estruturação

A complexidade do caso em estudo exigiu um esforço e um investimento especial para proceder ao levantamento, à caracterização e à estruturação da situação e dos problemas associados. Em primeiro lugar foi feito um estudo sobre a indústria em questão e como se processa a produção de calçado. Foi feito um guião sobre as informações que seria necessário levantar, e visitas à empresa piloto. As visitas serviram não só para fazer o levantamento do problema e dos dados que o compõem, mas também para validar o desenho do problema que foi sendo feito ao longo do tempo. Entre cada visita à empresa foram utilizados métodos como mapas mentais e figuras enriquecidas, que tiveram a função de facilitadoras de discussão no grupo de trabalho. Segue-se a descrição do problema, obtida através da modelação da realidade. Este modelo foi considerado pelo grupo de trabalho como satisfatório e representativo da realidade do problema por consenso.

3.2 Produção na indústria do calçado

A produção de calçado divide-se em 3 secções distintas: o corte, a costura e a montagem. No corte, as peles ou materiais sintéticos são cortados nas várias peças que compõe um sapato, com a

ajuda de cortantes ou de sistemas automáticos de corte a laser ou jactos de água, de forma a que o seu aproveitamento seja máximo. Na secção de costura as várias peças são costuradas e coladas dando origem à gáspea. Na secção de montagem é adicionada a sola à gáspea.

A empresa em questão tem estas 3 secções fisicamente separadas, em fábricas distintas, sendo que o estrangulamento, e as maiores dificuldades ocorrem na secção de costura, razão pela qual esta secção será o foco desta dissertação.

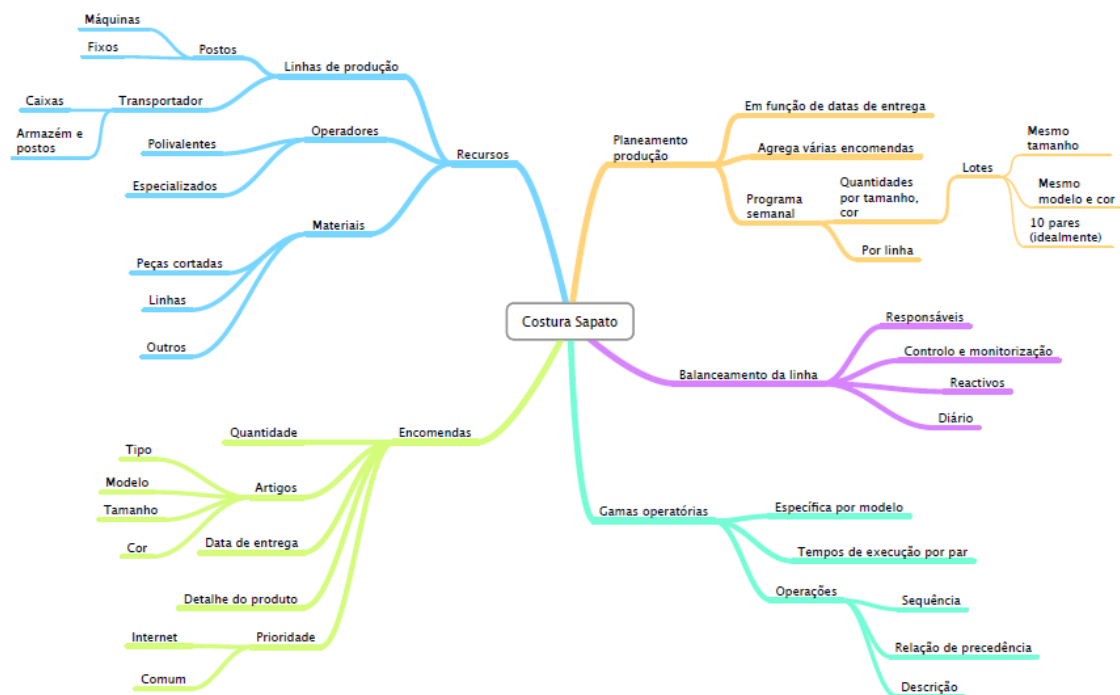


Figura 3.1: Mapa mental do problema

Através do mapa mental da Figura 3.1 pode-se verificar que, associada à costura do calçado, estão cinco ramos que descrevem todo o seu processo e o que ocorre a montante e a jusante. Segue-se a descrição detalhada de cada um destes ramos.

3.3 Encomendas e planeamento de produção

A produção é despoletada pelo pedido de encomenda por parte do cliente. Estas encomendas podem ser de três tipos:

- Encomenda de início de colecção, que resultam da venda por catálogo e são recepcionadas com uma época de antecedência, garantindo-se a resposta ao cliente em quatro meses;
- Encomenda de repetição, que correspondem normalmente a pedidos da época anterior, sendo dada resposta às mesmas em cinco semanas;

- Encomenda da Internet, que são encomendas efectuadas pelo cliente através da internet, e ao qual é dado um prazo de três semanas para a recepção da sua encomenda.

Depois de efectuado o registo das encomendas, o departamento de logística verifica a existência dos materiais necessários, sendo que no caso dos mesmos não existirem, é feita a encomenda aos respectivos fornecedores. Com a informação referente as encomendas existentes, e em função da capacidade da empresa e dos prazos de entrega, é efectuado um planeamento macro, onde é definida a distribuição dos produtos a produzir pelos subcontratados e pela produção interna. Nesta fase, o departamento de logística faz a distribuição do material a produzir pelas linhas onde as encomendas vão ser produzidas e o departamento de planeamento efectua uma segunda fase de planeamento. Cada encomenda é composta por um conjunto de modelos, os quais poderão ter várias cores e tamanhos. A quantidade é especificada para cada modelo, cor e tamanho do sapato.

As encomendas são analisadas e consoante as suas datas de entrega são lançadas ordens de fabrico. Cada ordem de produção agrupa por modelo, tamanho e cor, várias encomendas de clientes distintos. Existem também encomendas efectuadas pela internet, que representam pares de sapatos isolados e tem carácter prioritário em relação a todas as outras encomendas. Semanalmente, e com as ordens de fabrico, é desenvolvido um plano semanal. Este plano, específico por linha, contem a discriminação do que deve ser produzido durante uma semana. Este documento agrupa as encomendas por modelo. Para cada modelo faz a divisão por cor, tamanho e ordem de produção, tendo para cada modelo uma quantidade total que é necessário produzir. Da mesma forma que a secção de costura tem um plano semanal de produção, a secção anterior, a secção de corte também tem, e faz a sua gestão. Por não ser uma gestão centralizada, não existe coordenação entre ambas as secções para além de terem a informação do que é necessário produzir numa semana, o que implica que a secção de costura, tem de produzir, em função do material cortado que lhe é enviado uma a duas vezes por dia, pela secção anterior.

Com a informação sobre as quantidades estipuladas para uma semana, presente no plano semanal, e em função do material que tem disponível para produção são definidos lotes. Cada lote tem um número ideal de 10 pares, no entanto nem sempre isto é possível pois os lotes têm obrigatoriamente de ser do mesmo modelo, cor e tamanho. Os lotes são criados por uma operadora, seguindo essa lógica, no entanto quando não é possível, esta cria lotes com no mínimo 5 pares, ou no máximo 14. Quando é impossível criar lotes desta forma (existem várias encomendas em que só é pedido um par de um certo tamanho) são criados lotes com pares de sapatos do mesmo modelo e cor de vários tamanhos diferentes. Cada lote é introduzido numa caixa e lançado para a linha de produção onde são executadas as operações que compõe a gama operatória do modelo que a mesma contem.

Preferencialmente as caixas que são lançadas para a linha de produção têm gamas operatórias o mais semelhantes possível e usam as mesmas cores de linha, no entanto cada vez menos isso é possível pois em simultâneo, a linha de produção, tem diariamente de lidar com uma diversidade de vinte e cinco a trinta modelos.

3.4 Gamas operatórias

Gama operatória, é um documento específico para cada modelo. Este documento, contém a listagem das operações que devem ser executadas na costura de determinado modelo. Cada gama é constituída por um conjunto de operações, e o tempo de execução de cada operação por par de sapatos. As operações estão listadas na ordem pela qual devem ser executadas, e actualmente, cada gama contém também para cada operação, a informação do número do posto em que vai ser executada.

As gamas são imprescindíveis e sempre que é criado um modelo novo, tem de ser desenvolvida uma gama, que é guardada no sistema de informação. O seu desenvolvimento é efectuado por um responsável, que de forma experimental, constrói um sapato registando as operações que efectuou e tempos aproximados de execução. Quando um modelo entra em produção, e se a dimensão da encomenda o permitir, estes tempos de execução são monitorizados e actualizados no sistema de informação.

As gamas têm elevada importância, não só por servirem de “guião” para os operadores, mas também porque servem de *input* para o transportador de costura isto porque além das operações, tempos de execução, sequência de execução e relações de precedência, as gamas contém número do posto em que cada operação vai ser executada.

3.5 Recursos

O sistema produtivo da fábrica em questão tem, como se pode confirmar através do esquema da Figura 3.2, duas linhas de costura independentes, a linha de costura 1 e a linha de costura 2. Cada uma dessas linhas de costura tem um armazém de gravidade com dezasseis células. Cada célula tem capacidade para quatro caixas ou seja cada armazém pode albergar sessenta e quatro caixas no máximo. Entre os armazéns, embora independentes, existe um tapete transportador que permite a passagem de caixas com material a produzir de um armazém para o outro.

Cada linha de costura é composta por duas linhas, cada uma delas tem quarenta e oito postos, e um tapete rolante que é responsável pelo transporte de caixas entre o armazém e os postos. O transporte das caixas nunca é feito directamente entre postos, mas sim entre o posto e o armazém. No entanto, no caso de não existir necessidade de enviar para o armazém a caixa, por estar disponível posto onde se vai realizar a operação seguinte, existe um procedimento de envio rápido. O envio rápido implica que a caixa vá até ao fim da linha, mas não suba para o armazém, e volte a entrar no tapete rolante.

Cada uma das linhas produz preferencialmente determinados modelos específicos, no entanto está apta a produzir qualquer modelo. Todas as linhas têm máquinas semelhantes, no entanto existe na linha 4 um conjunto de máquinas onde são executadas operações de acabamento, que serve todas as linhas. Os postos são fixos e contêm máquinas, na sua maioria de costura de diversos tipos, sendo que existem postos que contêm mesas e utensílios destinados a operações tipicamente manuais, onde se executam operações como colar ou queimar linhas.

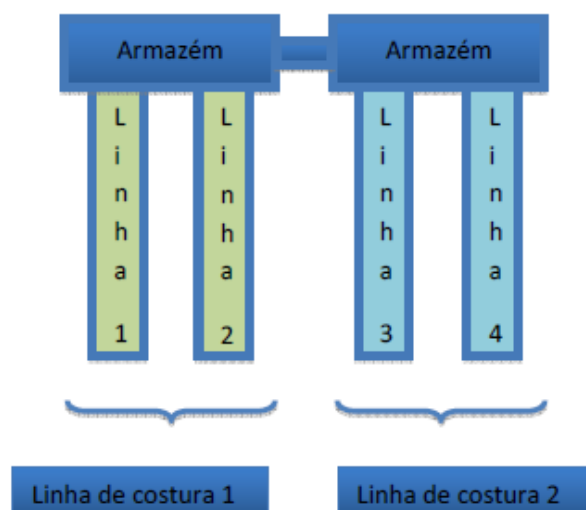


Figura 3.2: Representação do layout do transportador

Por uma questão de organização, os responsáveis quando distribuem trabalho pelas duas linhas de costura, atribuem as obras de menor dimensão à linha de costura 1, e as de maior dimensão à linha de costura 2. Esta atribuição faz com que a linha de costura 1 produza maior variedade de modelos em menores quantidades, e com que a linha de costura 2 tenha uma produção mais uniforme no que diz respeito a modelos, e em maior quantidade. Esta atribuição tem como consequência maior produtividade na linha de costura 2, do que na linha de costura 1 pois, devido à repetição das operações, os operadores tornam-se mais eficientes.

Os operadores, aproximadamente noventa, podem ser divididos em dois grandes grupos, os operadores especializados e os operadores polivalentes. Os operadores especializados, executam sempre as mesmas operações (é o caso por exemplo, dos operadores que estão responsáveis pelas operações de acabamento). Os operadores polivalentes, podem executar mais do que uma operação em mais do que uma máquina. Em média existe uma taxa de absentismo de aproximadamente 10%. Esta taxa de absentismo causa bastante transtorno, dificultando o planeamento e balanceamento da linha.

Para efectuar a produção de sapatos são necessários materiais, entre os quais linhas de costura, cola, apliques e a pele ou material sintético cortado. O material cortado vem de uma outra fábrica do mesmo grupo, em sacos, separados por modelo, cor e tamanho. Todo o material vem separado por modelo cor e tamanho. Para facilitar a distribuição dos lotes pelas caixas que são utilizadas no transportador de costura, para movimentar o produto em curso entre os postos de trabalho e os armazém.

3.6 Método de balanceamento actual

Actualmente o balanceamento é efectuado sem qualquer tipo de sistema de apoio à decisão, de forma reactiva. Os operadores são distribuídos pelos postos aleatoriamente, apenas em função das operações que sabem executar. As caixas são lançadas para a linha, em função da prioridade das encomendas e tendo em consideração o material cortado que existe disponível.

Os operadores começam a executar operações e existe um a dois responsáveis a monitorizar as caixas que se encontram em espera no armazém para cada posto. Se existirem postos sem caixas em espera, os responsáveis procuram no material que têm disponível para produção, modelos que necessitem das operações que neles são executadas e introduzem na linha. No caso de existirem várias caixas em espera para um determinado posto, os responsáveis atribuem esse trabalho a outro posto com máquina e operador compatível, desta forma, sempre que um dos dois esteja disponível recebe caixa para executar a operação. Esta é o meio que os responsáveis utilizam para efectuar o balanceamento e eliminar *bottlenecks*. Na realidade embora no imediato esta lógica represente uma solução, não existindo qualquer estudo, a eficiência da linha não é a esperada visto que os problemas são resolvidos pontualmente mas sem uma visão e objectivo global de produção.

3.7 Objectivo

Na Figura 3.3 encontra-se representado de forma sucinta o problema a resolver:

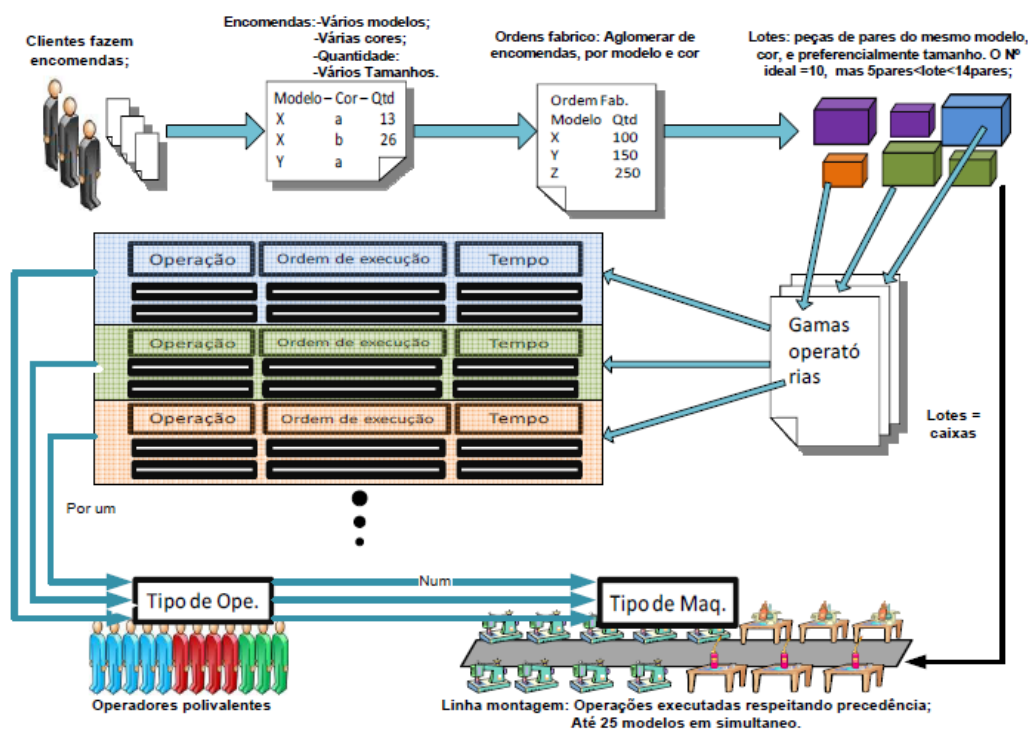


Figura 3.3: Descrição do problema

O objectivo deste trabalho é então o desenvolvimento de um sistema que seja integrado com o algoritmo do transportador, e que forneça para um horizonte temporal estipulado e para uma determinada quantidade objectivo de pares de sapatos, a distribuição das operações pelos operadores, tendo sido especificado pela empresa que esta distribuição deve garantir que todos os operadores trabalham na mesma proporção. Foi também especificado pela empresa que o sistema funcione como um todo, ou seja, que as linhas deixem de se comportar com linhas de produção independentes. A resolução deste problema terá estes aspectos em consideração, no entanto, o sistema só funcionará com a alteração do algoritmo do transportador.

O sistema deve garantir a gestão da polivalência dos funcionários e das máquinas, para um determinado conjunto de peças a produzir, de vários modelos em diversas quantidades, num determinado horizonte temporal.

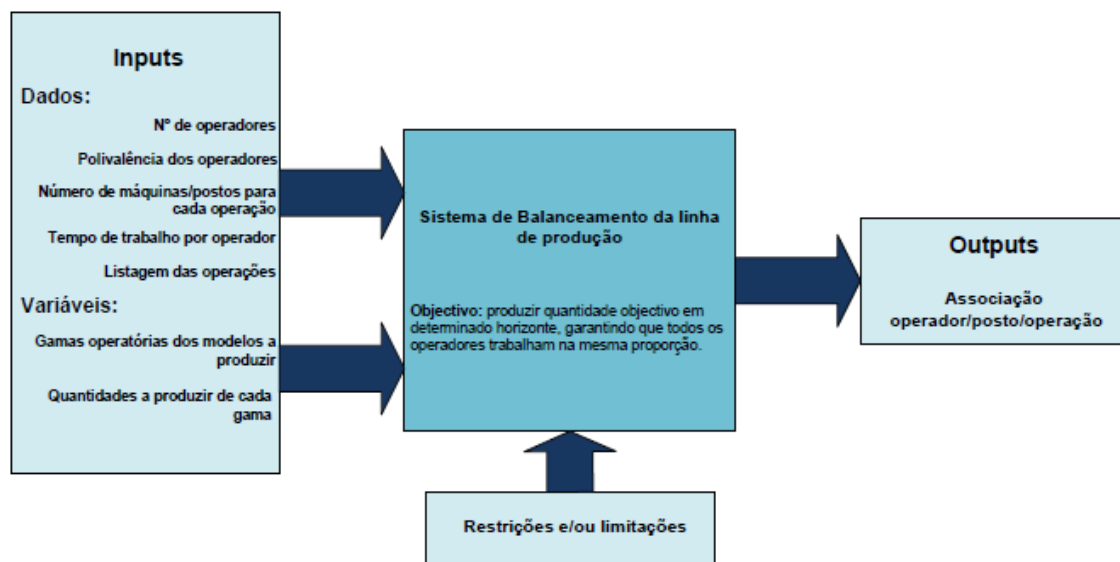


Figura 3.4: Diagrama descritivo das entradas e saídas esperadas do sistema de balanceamento

O diagrama da Figura 3.4 apresenta em síntese, o objectivo do sistema. Neste diagrama estão descritos os *inputs* que o sistema deve ter e os *outputs* esperados do mesmo. O sistema será descrito com mais detalhe no Capítulo 4.

Capítulo 4

Abordagem e resolução

No capítulo anterior, capítulo 3, foi feita uma descrição do caso industrial em estudo, bem como do problema a resolver e do objectivo a atingir. Tal foi possível após varias visitas à empresa, para levantamento e validação de dados.

A abordagem ao problema, a considerar neste capítulo, contempla o desenvolvimento de duas heurísticas complementares e um simulador. Foram também desenvolvidos modelos de optimização matemática.

As heurísticas têm como objectivo efectuar o balanceamento da linha de produção, respeitando as restrições e objectivos anteriormente definidos. Com o simulador pretendeu-se efectuar uma representação do comportamento do transportador, visto que este tem um algoritmo próprio de gestão de recursos e das movimentações.

Os modelos de optimização matemática pretendem representar o problema matematicamente e permitirão balizar e avaliar os resultados obtidos.

4.1 Descrição das heurísticas

O balanceamento de linhas de produção é um problema complexo, especialmente se incluir produção simultânea de modelos variados, como é o caso da empresa em questão. Torna-se por isso humanamente impossível fazer o balanceamento manualmente e obter resultados satisfatórios de produtividade. Seguidamente encontra-se a descrição do sistema desenvolvido e cujos objectivos são o balanceamento da linha de produção, e servir de ferramenta de apoio à decisão.

Como se pode ver na figura 4.1 o sistema desenvolvido está dividido em três partes. A primeira parte é responsável pelo tratamento dos dados provenientes das gamas operatórias; a segunda parte é responsável pela definição do número de operadores por cada super-operação, e pela verificação da existência de operadores e postos suficientes para produzir a quantidade de sapatos pretendida.

Por último, a terceira parte faz a distribuição das operações de cada gama pelos operadores definidos anteriormente. Esta última parte foi desenvolvida com o intuito de melhorar a primeira heurística.

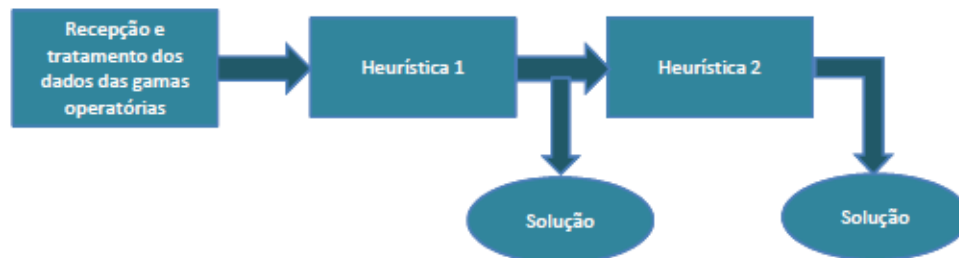


Figura 4.1: Sequência das heurísticas

4.1.1 Processamento de dados

O bloco um trata da recepção e tratamento das variáveis de entrada do sistema, tais como as gamas operatórias (ou seja operações e os tempos de execução por par) e, as quantidades a produzir de cada gama. Dados como, o número de funcionários e a polivalência dos mesmos, número de máquinas e operações possíveis de executar em cada uma, embora possam ser modificados no caso de existir alguma alteração a nível organizacional ou do processo, fazem parte da configuração do sistema.

Este bloco trata os dados da seguinte forma: multiplica os tempos de execução das gamas pelas quantidades a produzir de cada, obtendo assim o tempo total por gama. Pesquisa nas gamas por operações idênticas, e soma os tempos de execução já actualizados em função das quantidades necessárias, somando-as obtendo assim uma super-gama operatória que tem a informação do tempo total necessário por super-operação e, por conseguinte, por tipo de operador e máquina. Os dados de saída desta parte do sistema servem de entrada para a primeira heurística.

Segue-se um exemplo de pequena dimensão, com o objectivo de elucidar o leitor sobre a forma como se processa o tratamento dos dados que servem de it input para a heurística desenvolvida.

Na tabela 4.1 estão listados os postos por tipo com respectiva quantidade disponível. Existem cinco tipos de postos e cada um tem uma quantidade associada formando um total de trinta e três postos.

Tabela 4.1: Número de postos

Tipo de Posto	Quantidade
A	8
B	4
C	6
D	6
E	9

Na tabela 4.2 podemos verificar a quantidade de operadores, por tipo de operação que estão habilitados a executar. Pode-se verificar então que existem cinco tipos de operadores. De cada tipo existe um número de operadores que só sabe executar um tipo de operação. Existem também operadores que sabem executar mais do que uma operação. A estes operadores dá-se o nome de operadores polivalentes, sendo que são estes operadores que conferem maior flexibilidade ao sistema produtivo.

Tabela 4.2: Número de operadores

Tipo de operador	Quantidade	
A	2	4
B	3	
C	2	
D	3	2
E	4	

A tabela 4.3 permite observar o tempo de execução de cada operação por gama. O tempo de execução de cada operação por cada gama refere-se ao tempo necessário para executar essa mesma operação num par de sapatos sendo que este valor é representado em minutos.

Tabela 4.3: Gamas operatórias

Tipo de Operação	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
A	2	3	4	2	4	1	2	3
B	4	5	3	3	1	5	4	4
C	3	2	2	4	6	2	5	3
D	3	2	4	1	2	3	2	3
E	2	4	3	3	5	3	4	2

De cada modelo (gama operatória) existe uma quantidade de pares a produzir. Neste cenário não se considerou a dimensão dos lotes, apenas a quantidade total a produzir. Estes dados estão representados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Número de pares que é necessário produzir por gama

Quantidade a produzir por gama							
G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
80	90	65	85	80	75	70	80

Ao multiplicar o número de pares a produzir de cada gama operatória pelo tempo de execução respectivo de cada operação e fazendo posteriormente a soma destes valores por operação, obtemos o tempo total necessário para a execução das super-operações como se pode verificar através da tabela 4.5:

A tabela representa a super-gama, e serve de *input* para a heurística de associação de super-operações a operadores e a postos. Visto que o caso em questão trata um problema de produção

Tabela 4.5: Necessidade de tempo de execução por cada super-operação

Necessidade de tempo de execução por cada super-operação					
A	B	C	D	E	Total
1635	2275	2110	1530	2035	9585

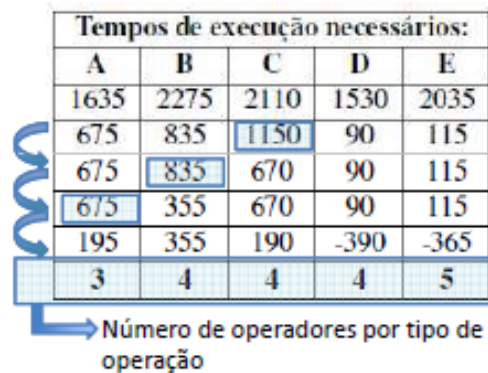
de modelo misto, e nestes casos as operações mesmo que semelhantes, têm durações diferentes consoante o modelo, este tratamento dos dados representa uma simplificação, na tentativa de aproximar o problema ao problema simples de balanceamento de produção.

4.1.2 Heurística de associação de carga de trabalho por operador e posto

O bloco dois deste diagrama representa a heurística responsável pela associação de operações da super-gama a postos, e de operadores a postos. Esta heurística pretende fazer a melhor associação possível dos funcionários polivalentes, isto porque todos os operadores devem obrigatoriamente executar operações, em quantidades o mais semelhantes possível. Devido a esta restrição a heurística desenvolvida tem como primeiro passo a associação dos operadores que não são polivalentes ao posto respectivo e à única operação que sabem executar. No passo seguinte, ao tempo necessário para executar cada operação da super-gama é retirado o tempo de operação que já se encontra associado aos operadores não polivalentes.

Dos tempos de operação que resultam do passo anterior é escolhido o maior, é verificado se existe operador polivalente e máquina para executar a operação correspondente ao tempo em falta. Se não existir máquina ou operador disponível para executar a operação, esta é retirada da lista das necessidades, e volta a iniciar todo o processo com a operação cujo tempo necessário para a sua execução seja o maior. Se existir, é feita a alocação da operação ao operador e à máquina, e os tempos de necessidade de operação são actualizados, sendo posteriormente verificado se ainda existem operadores disponíveis. Se existirem retorna para o segundo passo da heurística, se não existirem devolve a solução. A solução devolvida indica quantos operadores estão associados a cada operação e quanto tempo de operação lhes está destinado. De forma semelhante ao caso do bloco anterior, apresenta-se na tabela 4.6 um pequeno exemplo demonstrativo de como é feita a associação operação/operador/posto:

A primeira linha da tabela com valores, representa as necessidades de tempo que foram obtidos pelo tratamento dos dados, na formação da super-gama. A segunda linha da tabela contém a necessidade de tempo de execução por operação, já actualizados, após a alocação dos funcionários não polivalentes às operações, visto que o número de postos assim o permitiu. Esta alocação do operador é feita tendo em conta que cada operador tem tempo disponível de trabalho de 8 horas, ou seja 480 minutos. Por análise dos valores obtidos neste último passo, é escolhido o valor mais alto (o valor que se encontra sinalizado). À operação que contem o valor máximo de necessidade de tempo de execução, foi verificado se existe posto, e operador polivalente para a executar. Visto que havia, foi alocado um operador, ou seja, é retirado ao tempo necessário para a operação, 480



A	B	C	D	E
1635	2275	2110	1530	2035
675	835	1150	90	115
675	835	670	90	115
675	355	670	90	115
195	355	190	-390	-365
3	4	4	4	5

Número de operadores por tipo de operação

Tabela 4.6: Sequência das heurísticas

minutos. Foi novamente verificado o valor maior de necessidade de tempo e todo o processo foi repetido até estar feita a alocação de todos os operadores.

Como podemos verificar pela tabela e como foi afirmado anteriormente, é requisito da empresa que todos os operadores sejam alocados pelo menos a uma operação, assim sendo, mesmo quando a necessidade não o justifica inteiramente, (é o caso das operações D e E) é feita a alocação dos operadores. Desta heurística resulta o número de operadores por super-operação. O terceiro bloco, é uma heurística também de associação de operações a operadores, que recebe como input a solução da heurística anterior. Se a heurística anterior fazia a associação das super-operações da super gama a operadores, esta faz a desfragmentação das super-operações em operações de cada gama.

A heurística descrita anteriormente, encontra-se esquematizada no diagrama da Figura 4.2. Neste diagrama o leitor poderá de forma mais fácil compreender como é feita a atribuição das super-operações pelos operadores e pelos postos.

4.1.3 Heurística de distribuição das operações pelos operadores

O terceiro bloco, é uma heurística de associação de operações a operadores, que recebe como input a solução da heurística anterior. Se a heurística anterior fazia a associação das super-operações da super gama a operadores, esta faz a desfragmentação das super-operações em operações de cada gama.

A heurística 2 (Figura 4.3) desenvolvida para o problema de balanceamento de linhas de produção, associa os tempos de execução das operações de cada gama, já multiplicados pela quantidade a produzir aos operadores que são o *output* da heurística 1 4.2. Esta heurística assume que o número de operadores como fixo, que os tempos de execução das operações das gamas podem ser repartidos pelos operadores, e que cada operador deve executar a operação que lhe compete do mínimo possível de gamas diferentes. Quando o tempo de execução da operação de gama de maior dimensão é seleccionado para ser alocado ao operador com maior capacidade, mesmo que esta seja inferior ao tempo de execução da operação de gama, a associação é efectuada. Ao tempo

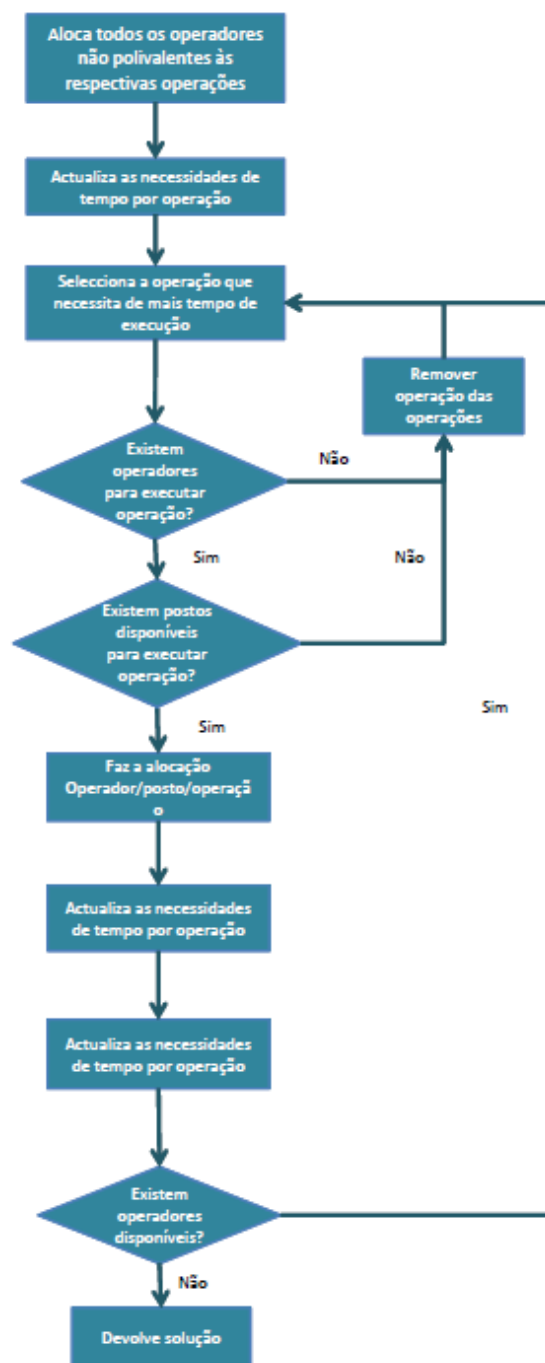


Figura 4.2: Heurística de associação de carga de trabalho por operador e posto

de execução da operação de gama é retirado o valor correspondente ao tempo que o operador tinha de capacidade antes da associação, e com a dimensão actualizada, o tempo de execução da operação de gama retorna para a listagem dos operações de gama a associar. Esta heurística encontra-se esquematizada na Figura 4.3.

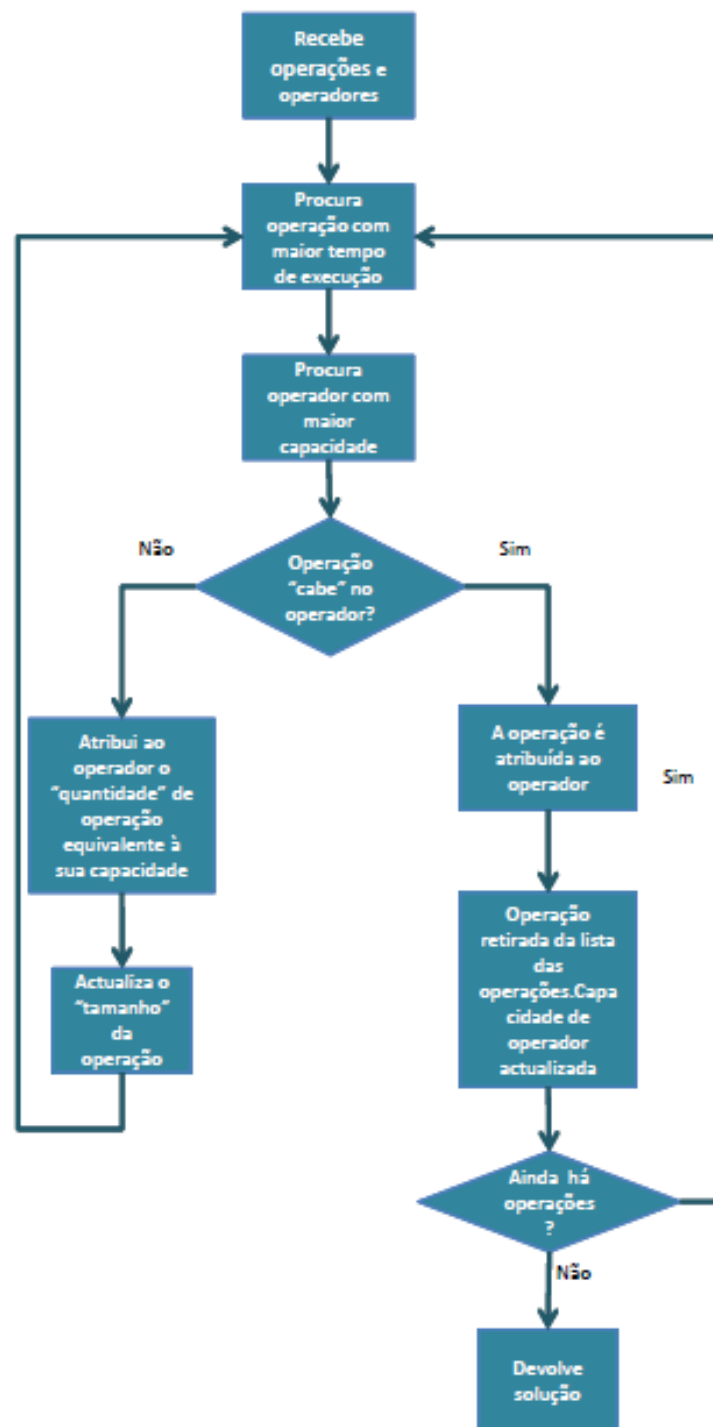


Figura 4.3: Heurística de distribuição das operações pelos operadores

4.1.4 Solução

O sistema desenvolvido retorna duas soluções, uma primeira solução resultante da heurística 1, que indica o número de operadores por cada super-operação, sendo de cada um desses operadores

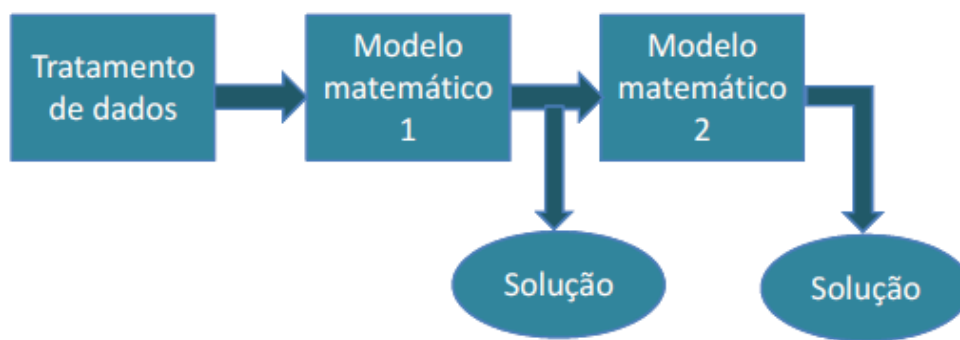


Figura 4.4: Modelação matemática

pode executar qualquer operação de qualquer gama, desde que seja da super-operação que lhe foi destinada.

A segunda solução que se obtém do sistema, é a atribuição de operações específicas de gamas aos operadores. Esta heurística foi desenvolvida com o objectivo de melhorar e afinar a heurística 1, de forma a que a distribuição das operações fosse mais específica, chegando a indicar exactamente que operações o operador deve executar e em que percentagem.

4.2 Modelação matemática

Foram desenvolvidos dois modelos de optimização para apoiarem a resolução do problema do balanceamento das linhas de produção. O primeiro, faz a distribuição das super-operações pelos operadores, garantindo as restrições de máquinas e operadores polivalentes, e tem como objectivo a minimização do tempo de não trabalho dos operadores.

O segundo, tem como input, o output do modelo anteriormente descrito e faz a distribuição das operações de cada gama por cada operador.

4.2.1 Modelação matemática

O *input* para o primeiro modelo consiste nos valores somados dos tempos de execução necessários para cada operação de todas as gamas, ou seja, as gamas operatórias que contêm a listagem de todas as operações que as compõem e respectivos tempos de execução, sendo que estes tempos de execução são multiplicados pela quantidade que é necessário produzir de cada gama. Os valores obtidos são somados por operação, e é assim formado aquilo que neste documento é apelidado de super-gama. Por essa mesma lógica a super-gama é composta por super-operações.

As super-operações são então o *output* do tratamento de dados das gamas operatórias e servem de *input* para o Modelo matemático 1, cujo *output* são o número de trabalhadores para cada uma dessas super-operações.

4.2.2 Modelo matemático 1

As super-operações são então o *output* do tratamento de dados das gamas operatórias e servem de *input* para o Modelo matemático 1, cujo output é o número de trabalhadores para cada uma dessas super-operações.

Variáveis

$$i, i = 1 \dots I : \text{operador } i; \quad (4.1)$$

$$j, j = 1 \dots J : \text{posto } j; \quad (4.2)$$

$$k, k = 1 \dots K : \text{super-operação } k; \quad (4.3)$$

$$T_k : \text{tempo de trabalho necessario para a operacao } k; \quad (4.4)$$

$$TD : \text{tempo de trabalho disponivel por operador } k; \quad (4.5)$$

$$W_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{par operador } i, \text{ posto } j \text{ pode realizar super-operação } k \\ 0 & \text{cc.} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{operador } i \text{ associado a posto } j \text{ para executar super-operação } k \\ 0 & \text{cc.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Restrições

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1, i = 1 \dots I \quad (4.8)$$

$$X_{ijk} - W_{ijk} \leq 0, i = 1 \dots I, j = 1 \dots J, k = 1 \dots K \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ijk} \geq 1, k = 1 \dots K \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K X_{ijk} \leq 1, j = 1 \dots J \quad (4.11)$$

- A restrição 4.8 garante que todos os operadores são associados a uma máquina e a uma supe-operação;
- A restrição 4.9 garante que a associação só é efectuada se existir compatibilidade entre operador, posto e super-operação;

- A restrição 4.10 garante que todas as super-operações são realizadas;
- A restrição 4.11 garante que associamos no máximo um par operador/super-operação a cada posto;

Função objectivo:

O objectivo deste modelo como se pode verificar na equação 4.12 é minimizar o tempo de não trabalho dos operadores.

$$z = \min \left\{ \sum_{k=1}^K |T_k - TD| \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ijk} \right\} \quad (4.12)$$

4.2.3 Modelo matemático 2

O Modelo matemático 2, usa o output do Modelo matemático 1. Com este modelo matemático pretende-se que as super-operações sejam novamente "desdobradas" em operações associadas a gamas, e que estas sejam distribuídas pelo número de operadores determinado no Modelo matemático 1. Neste modelo já não são considerados os postos, pois o modelo anterior já fez essa associação. O modelo matemático a seguir exposto, pretende a associação das operações das gamas aos operadores. Neste modelo, quando o tempo necessário de execução de operação relativo a uma gama, é superior ao tempo que o operador ao qual, essa mesma operação está a ser associada, tem disponível, a capacidade do operador é preenchida de forma a ficar sem tempo disponível de trabalho, sendo que o tempo que resta da operação é associado a outro operador.

Variáveis:

$$M = \text{parametro auxiliar da restricao 4.19} \quad (4.13)$$

$$b_i, i = 1, \dots, m : \text{operador } i; \quad (4.14)$$

$$l_j, j = 1 \dots n : \text{operacao da gama } j; \quad (4.15)$$

$$W : \text{capacidade de cada operador}; \quad (4.16)$$

$$Y_{ij} : \text{tempo de execucao da operacao da gama } j \text{ associado ao operador } i; \quad (4.17)$$

$$X_{ij} : \text{numero de elementos em que cada operacao vai ser dividida} \quad (4.18)$$

Restrições:

$$Y_{ij} \leq M X_{ij} \quad (4.19)$$

$$\sum_{i=1}^m Y_{ij} = l_j, j = 1 \dots n \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{ij} \leq W, i = 1 \dots m \quad (4.21)$$

1. A restrição 4.19 garante a associação definida entre as variáveis X_{ij} e Y_{ij} ;
2. A restrição 4.20 garante que todos as operações são associados a pelo menos um operador;
3. A restrição 4.21 garante que não é excedida a capacidade trabalho de cada operador.

Função objectivo:

O objectivo é como se pode verificar através da equação 4.22 minimizar o número de operações diferentes associados a cada operador.

$$z = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (4.22)$$

4.2.4 Programação matemática do modelo 1

De forma a testar os modelos e verificar a validade dos mesmos, recorreu-se a uma ferramenta *freeware*, o GLPK (GNU Linear Programming Kit). Esta ferramenta, é destinada a resolver problemas de grande escala de programação linear através do método simplex. Foi efectuada a programação matemática dos dois modelos e ambos foram testados com o exemplo usado anteriormente na secção 4.1 onde foi efectuada a descrição da heurística.

No anexo A pode ser consultado o código resultante da programação matemática do modelo 1.

Este modelo foi testado com o cenário definido anteriormente na secção 4.1, no entanto, o tratamento de dados foi efectuada manualmente, ou seja, a soma dos tempos de execução necessários por operação de cada gama foram já somados por tipo de operação. O *input* deste modelo são os operadores, os postos, as operações, o tempo de execução necessário por operação, o tempo disponível por cada operador e a associação operador/posto/operação (que indica que contém a informação de que operações podem ser executadas por que operadores e em que postos). Estes dados podem ser consultados nas tabelas apresentadas seguidamente. Será de ter em atenção que devido à extensão dos dados, a tabela 4.8 com a variável j , e a tabela 4.12 não se encontram completas, pretendendo assim representar apenas a forma como os dados foram inseridos, estando os dados completos presentes nas tabelas 4.2 e 4.1. Por ser necessário para a introdução dos dados, as operações alteraram a sua nomeação, passando de A,B,C,D e E para 1,2,3,4 e 5 respectivamente.

Para construir o conjunto de dados referentes ao parâmetro w (4.6), que descreve que operações podem ser executadas por que operadores e em que postos, foram cruzados os dados referentes à polivalência dos operadores e as operações que podem ser executadas nos postos.

O modelo 1 foi testado com estes dados, tendo sido utilizados 0,1 segundos de CPU, e tendo sido obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4.7: Valores para a variável i - operadores

Operadores: i																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Tabela 4.8: Valores para a variável j - postos

Postos: j																	
1	2	3	4	5	6	7	8	25	26	27	28	29	30	31	32	33

Tabela 4.9: Valores para a variável k - operações

Operações: k				
1	2	3	4	5

Tabela 4.10: Parâmetro t - tempo de execução necessário por operação

Operação	1	2	3	4	5
Parâmetro t (min)	1635	2275	2110	1530	2035

Tabela 4.11: Parâmetro td - tempo disponível por operador

Parâmetro td (min)	480
--------------------	-----

Tabela 4.12: Valores da variável w - associação operador/posto/operação

Parametro w
[i,j,k]=0 ou 1
[1,1,1]=1
[1,1,2]=0
[1,1,3]=0
.....
[20,33,3]=0
[20,33,4]=0
[20,33,5]=1

Tabela 4.13: Resultados obtidos do modelo 1

Operação	Nº de Operadores	t-td(min)	Taxa de ocupação
1	3	195	113,54%
2	4	355	118,49%
3	4	190	109,90%
4	4	-390	79,69%
5	5	-365	84,79%
		Média	101,28%

4.2.4.1 Análise crítica dos resultados obtidos

Na tabela 4.13 pode-se verificar a distribuição dos funcionários as operações, a diferença entre o tempo necessário para executar as operações e o tempo disponível pelos operadores assignados

a essas mesmas operações e, por fim, a taxa de ocupação média dos funcionários total e por operação.

Da análise destes dados pode-se concluir que não existem funcionários suficientes para executar as primeiras três operações, o que vai levar a uma sobrecarga de trabalho para os operadores que a elas estão associados. Pode-se também concluir que para as operações 4 a 5, o total de tempo disponível é superior ao necessário para executar as operações. Mesmo não sendo necessária, a alocação dos operadores é feita, pois este é um requisito da empresa, todos os operadores têm de ser afectados a no mínimo uma operação. A taxa de ocupação reflecte isso mesmo, fica claro que a ausência de operadores suficientes para executar determinadas operações, o excesso de operadores para outras operações e a obrigatoriedade de alocação de todos os operadores a pelo menos uma operação afecta a qualidade da solução.

4.2.5 Programação matemática do modelo 2

O modelo 2 foi também testado no GLPK, como no caso do modelo 1. Foi efectuada a programação matemática do modelo 2, cujo código se pode encontrar no anexo A, e foi efectuado o teste. O teste teve como dados de entrada, os resultados obtidos no teste do modelo 1 (o número de operadores por cada operação), a listagem de todas as operações das gamas e o tempo de execução necessário de cada uma dessas operações para as quantidades estipuladas.

Tabela 4.14: Dados para teste de modelo 2

	Operação 1	Operação 2	Operação 3	Operação 4	Operação 5
Nº de operadores	m=3	m=4	m=4	m=4	m=5
Nº de op. de gamas	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8
Tempo de execução necessário de por cada Operação de gama (l= Operação tempo)	G1 l=160	G1 l=320	G1 l=240	G1 l=240	G1 l=160
	G2 l=270	G2 l=450	G2 l=180	G2 l=180	G2 l=360
	G3 l=260	G3 l=195	G3 l=130	G3 l=260	G3 l=195
	G4 l=170	G4 l=255	G4 l=340	G4 l=85	G4 l=255
	G5 l=320	G5 l=80	G5 l=480	G5 l=160	G5 l=400
	G6 l=75	G6 l=375	G6 l=150	G6 l=225	G6 l=225
	G7 l=140	G7 l=280	G7 l=350	G7 l=140	G7 l=280
	G8 l=240	G8 l=320	G8 l=240	G8 l=240	G8 l=160
Parametro M (big M)	M=330	M=500	M=500	M=500	M=500
Tempo por operador	w=545	w=569	w=528	w=383	w=407

O teste foi efectuado para cada operação individualmente com os dados de entrada presentes na tabela 4.14. A variável m representa o número de operadores associados a cada operação, a variável n representa o número de operações de gama por distribuir pelos operadores. A variável l contém a informação de quanto tempo de execução é necessário por cada operação de gama.

Será de ter em consideração que a capacidade dos operadores, foi alterada de 480 minutos (8 horas de trabalho) para os valores que resultaram do modelo anterior e que representam o tempo de execução necessário por operação para que a quantidade desejada de pares de sapatos seja totalmente produzida. O valor associado a w , ao representar o tempo de execução necessários por

operador, garante que a distribuição das operações de gama pelos operadores vai ser efectuada de forma a que todos os operadores tenham a mesma carga de trabalho, sendo este um dos requisitos pré-definido pela empresa piloto.

Para o teste referente aos dados da operação 1, o tempo de CPU foi de 0,1 segundos. No teste com os dados da operação 2 foram obtidos resultados em 82,2 segundos, da operação 3 em 124,1 segundos e por fim da operação 4 o tempo de CPU foi de 1,9 segundos. O teste referente à operação 5 apenas apresentou resultados ao fim de 147082,1 segundos. Ao analisar os dados em teste, e o tempo de CPU consumido para obter resultados, pode-se concluir que ao aumentar o número de operadores, a programação matemática deixa de ser viável, mesmo fornecendo o resultado óptimo, por exigir elevados recursos computacionais e por não apresentar resultados em tempo útil.

Os resultados obtidos nos cinco testes estão expressos na tabela 4.15:

Tabela 4.15: Resultados obtidos do modelo 2

Operação1			Operação2			Operação3			Operação4			Operação5		
Op	G	t	Op	G	t	Op	G	t	Op	G	t	Op	G	t
1	G5	320	4	G1	152	8	G4	340	12	G1	202	16	G1	160
	G8	225		G4	255		G7	188		G2	180		G3	148
2	G1	160		5	G7	162	9	G1	214	13	G1		38	17
	G4	170	G2		450	G6		150	G3		260	G8	8	
	G6	75	G7		118	G7		162	G4		85	G4	255	
	G7	140	6	G1	168	10	G1	26	14	G5	143	18	G8	156
	3	G2		270	G5		26	G3		22	G8		240	G2
G3		260		G6	375		G5	480		G5	17		G3	47
G8		15	7	G2	195	11	G2	180	15	G6	225	19	G5	400
				G5	54		G3	108		G7	140		G7	7
				G8	320		G8	240					G6	134

Na tabela 4.15, para cada tipo de operação encontra-se a distribuição por cada operador(Op), das operações por gama(G), e o tempo que cada operador deve executar de cada operação de cada gama(t). Os resultados obtidos, garantem que todos os trabalhadores executam o mesmo tempo de operações de gama, e que cada um faz o mínimo possível operações de gama diferentes.

Capítulo 5

Simulação e Discussão de resultados

Neste capítulo as heurísticas descritas no capítulo anterior, serão alvo de simulação, numa ferramenta desenvolvida propositadamente para o efeito. Para efectuar a simulação foram desenvolvidos 2 cenários. O primeiro cenário é de pequena dimensão e já foi anteriormente utilizado no capítulo 4 para explicar o funcionamento das Heurísticas, e para testar os modelos matemáticos desenvolvidos. Posteriormente será efectuada simulação de um cenário que pretende representar a realidade da empresa. Para ambos os cenários será efectuada uma análise crítica e serão efectuadas algumas variações nos dados de forma a que seja possível tecer considerações sobre a performance do sistema desenvolvido.

5.1 Simulador

Por forma a poder testar as heurísticas, foi necessário desenvolver um simulador. A aplicação em questão tem como objectivo representar o comportamento do transportador que está, na realidade, instalado na empresa piloto e que tem um algoritmo próprio. O facto de o transportador ter, um algoritmo associado limita, de certa forma, qualquer solução que seja obtida, na medida em que o mesmo é reactivo, e tem procedimentos definidos para eventos não previstos.

5.1.1 Algoritmo do transportador

O transportador que trata do envio de caixas dos postos para o armazém, do armazém para os postos de trabalho e do envio rápido, tem um algoritmo próprio de gestão de pedidos de caixa.

Cada transportador tem dois tabuleiros, o tabuleiro superior que alimenta os postos, e o tabuleiro inferior que trata do retorno das caixas para o armazém. Em cada posto, devem estar duas caixas, uma em espera, e uma a ser trabalhada. O local próprio para a caixa em espera é no tabuleiro superior onde existe um sensor cts (célula do tabuleiro superior), e o local próprio para a caixa a ser trabalhada é no sensor no tabuleiro inferior cti (célula do tabuleiro inferior).

No caso de o posto se encontrar com uma caixa em espera e uma a ser trabalhada, como é suposto, $cts=1$ e $cti=1$. No caso de no posto se encontrar uma caixa a ser trabalhada e de não existir nenhuma caixa em espera, $cts=0$ e $cti=1$. Existe finalmente, o caso em que o posto se encontra parado, ou seja, $cts=0$ e $cti=0$. Sempre que $cts=0$ é gerado um pedido de caixa para o posto em questão.

O diagrama presente na Figura 5.1 representa o funcionamento do transportador, quando a fábrica se encontra em funcionamento. O que se pretende é, portanto, a fazer a demonstração de como o transportador gere a movimentação de caixas entre postos. A gestão automática desta movimentação, como se provará mais adiante neste documento, influencia drasticamente os resultados.

5.1.2 Algoritmo do transportador - envio rápido

De forma a tornar o sistema mais rápido, além deste algoritmo, existe um outro, que trata do envio rápido de caixas para postos, como se pode verificar na Figura 5.2, sem que estas tenham de retornar ao armazém.

Quando uma caixa é trabalhada e enviada pelo tapete inferior em direcção ao armazém, existe um leitor imediatamente antes do armazém que lê o código da caixa. O algoritmo verifica se a caixa satisfaz algum pedido de caixa, se satisfizer envia a caixa para o posto, sem que esta tenha de ir ao armazém.

5.2 Cenários e simulação

Para cada cenário serão fornecidos os seguintes dados:

- O número de postos e que operações se podem executar em cada um;
- O número de operadores e que operações estão eles habilitados a executar;
- O número de operações existentes;
- As gamas operatórias (e consecutivamente o tempo de execução de operação por par);
- A quantidade a produzir por cada gama.

O tempo disponível de trabalho por cada operador é 480 minutos, este valor encontra-se predefinido no sistema e equivale a um dia de trabalho de 8 horas.

5.2.1 Cenário 1

O primeiro cenário já apresentado anteriormente, embora não represente a dimensão do problema em questão, tem como objectivo fornecer uma melhor percepção do como a heurística funciona quando testada no simulador. Nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 encontram-se os dados do primeiro cenário.

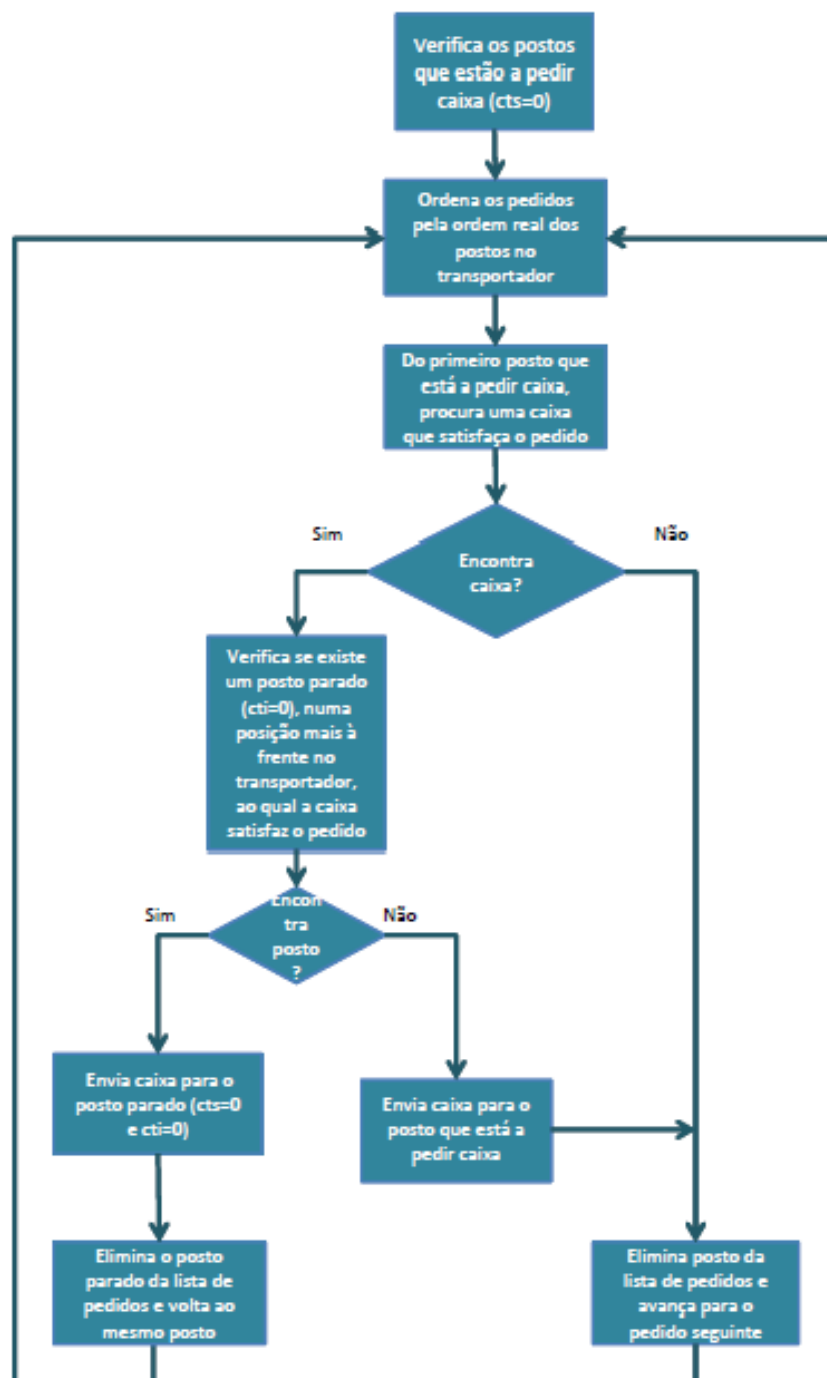


Figura 5.1: Algoritmo do transportador

Definiram-se apenas cinco operações possíveis de realizar, ou seja, no máximo cada gama operatória tem as seguintes cinco operações:

Existem no total trinta e três postos. Estes estão distribuídos pelas diversas operações como se pode verificar através da tabela 5.2 :

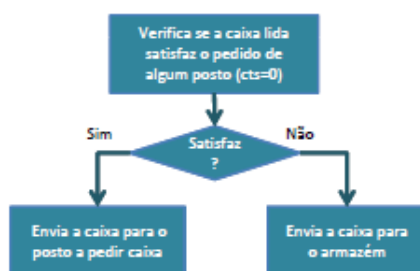


Figura 5.2: Algoritmo do transportador - Envio rápido

Tabela 5.1: Operações

Operações				
A	B	C	D	E

Tabela 5.2: Número de postos

ID Posto	Operação	ID Posto	Operação
1	A	18	C
2	A	19	D
3	A	20	D
4	A	21	D
5	A	22	D
6	A	23	D
7	A	24	D
8	A	25	E
9	B	26	E
10	B	27	E
11	B	28	E
12	B	29	E
13	C	30	E
14	C	31	E
15	C	32	E
16	C	33	E
17	C		

Na tabela 5.3 pode-se verificar as operações que os vinte operadores estão habilitados a executar:

Na tabela 5.4 estão listadas as operações que compõem cada gama operatória. Para cada operação de cada gama operatória é também fornecido o tempo de execução necessário para executar essa mesma operação em um par.

A quantidade total a produzir são 625 pares e na tabela 5.5 pode-se verificar o número de pares que é necessário produzir por cada gama operatória:

Tabela 5.3: Número de operadores

ID Operador	Operação	ID Operador	Operação		
1	A	11	E		
2	A	12	E		
3	B	13	E		
4	B	14	E		
5	B	15	A	B	C
6	C	16	A	B	C
7	C	17	A	B	C
8	D	18	A	B	C
9	D	19	D	E	
10	D	20	D	E	

Tabela 5.4: Gamas operatórias

Tipo de Operação	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
A	2	3	4	2	4	1	2	3
B	4	5	3	3	1	5	4	4
C	3	2	2	4	6	2	5	3
D	3	2	4	1	2	3	2	3
E	2	4	3	3	5	3	4	2

Tabela 5.5: Quantidade por gama operatória

Quantidade a produzir por gama							
G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
80	90	65	85	80	75	70	80

5.2.2 Cenário 2

Com o segundo cenário tenciona-se representar a realidade da empresa para um dia de produção. Devido à extensão dos dados, estes não se encontram aqui detalhados.

Neste cenário foram considerados:

- 33 operações distintas;
- 180 postos distintos, existindo para todas as operações mais do que um posto que as executa;
- 90 operadores, sendo que destes, apenas 20 estão habilitados a executar mais do que uma operação;
- 25 gamas operatórias diferentes;
- Cada gama operatória não é obrigatoriamente compostas por todas as operações;
- Os tempos de execução de cada operação está em minutos e refere-se ao tempo necessário para executar essa mesma operação em um par;

- A quantidade total a produzir são 1500 pares, esta quantidade está distribuída pelas gamas operatórias de forma irregular.

5.2.3 Pressupostos e factores relevantes para o balanceamento

A simulação é um metodo usado, para depois de modelado um problema, testar o seu comportamento segundo diversos parâmetros de interesse e cenários, para verificar qual o seu comportamento na realidade. Para o caso do balanceamento de linhas de produção, e em específico para para o problema em questão é importante definir o que se pretende avaliar, e quais são os factores que mais podem influenciar na realidade o sucesso do sistema desenvolvido.

Para efectuar a simulação foram então definidas várias situações, com o intuito de tirar conclusões sobre o comportamento das heurísticas desenvolvidas e a influência que alguns factores exercem na performance das mesmas.

Os indicadores de desempenho, que são automaticamente exportados do sistema desenvolvido são:

- *Makespan* - Intervalo de tempo entre o momento em que se inicia a execução da primeira operação, e o momento em que termina a execução da ultima operação;
- Taxa média de ocupação dos operadores;
- Taxa de ocupação mínima e máxima dos operadores;

O sistema desenvolvido exporta também um diagrama com a simulação do comportamento do transportador aos dados fornecidos pelas heurísticas.

Dos factores, que segundo a literatura tem influência sobre o balanceamento de produção, foram escolhido os que pareceram fazer mais sentido para o problema em estudo. Assim sendo será feita a simulação de ambos os cenários, de forma a compreender que impacto tem a polivalência dos operadores e o sequenciamento.

Em linhas de produção como a linha em questão, que efectua a produção de modelos mistos existem dois problemas intimamente ligados e que permitem uma utilização mais eficiente dessas mesmas linhas. Esses dois problemas são então o balanceamento de linhas de produção e o sequenciamento de modelos cujas pesquisas consideram separados e sequenciais[18].

Visto que o âmbito deste projecto não inclui o sequenciamento de modelos para entrada em produção, apenas o balanceamento da linha de produção, foram efectudas simulações com o objectivo de comprovar o impacto que o sequenciamento tem[19], tendo sido usado para tal, regras de despacho bem conhecidas, tais como SPT(*Shortest Processing Time*) e LPT (*Longest Processing Time*)[20] .

5.2.4 Simulação do Cenário 1

Esta simulação, de um cenário de menor dimensão, tem como objectivo demonstrar de forma mais eficiente e clara o comportamento das heurísticas e do simulador, quando o cenário é sujeito a algumas alterações.

A primeira simulação com o cenário 1, foi considerada como sequência de entrada em produção a ordem pela qual estão dispostas as gamas na tabela 5.4. A divisão das quantidades a produzir pelos lotes foi efectuada para esta simulação de acordo com o que se faz actualmente na empresa piloto, ou seja, os lotes são compostos por pares do mesmo modelo, cor e tamanho, sendo a dimensão mínima admissível de um lote 5 pares, a máxima 14 pares e a ideal 10 pares.

As tabelas com o *output* de todas as simulações podem ser encontradas no anexo B.

5.2.4.1 Simulação cenário 1 - Heurística 1

Na primeira simulação efectuada com o cenário 1, cujos dados podemos consultar na figura 5.3, não foi efectuada qualquer tipo de alteração aos dados de entrada. Neste primeiro caso, os dados do cenário 1 foram submetidos à heurística 1, que faz a distribuição das operações pelos operadores.

Na imagem o eixo vertical corresponde ao número de trabalhadores e o eixo horizontal ao tempo de execução das operações. Cada bloco representa o tempo de execução de uma operação num lote. Os espaços não preenchidos correspondem a tempo de não trabalho por parte dos operadores. Esta imagem deve ser analisada do topo até à base, isto porque os operadores estão listados de forma ordenada, desde o topo até à base da imagem. A taxa de ocupação de cada operador é relativa ao período entre o início da primeira operação e a conclusão da última que o mesmo executa.

Através da análise da imagem acima referida, pode-se concluir que existem 2 operadores, os 2 últimos, que têm taxa de ocupação bastante reduzida. Isto tem como explicação a obrigatoriedade de associar todos os operadores disponíveis às operações, mesmo que este não sejam estritamente necessários. Mesmo com o impacto que estes dois operadores têm no cálculo da taxa de ocupação média, esta apresenta um valor de 80,51% sendo considerado este valor razoável.

5.2.4.2 Simulação cenário 1 - Heurística 2

Na segunda simulação, os dados do cenário 1, também sem alterações, juntamente com os dados de saída da heurística 1 fora, submetidos à heurística 2. Através desta simulação pretendeu-se verificar segundo os critérios presentes na heurística, a distribuição das operações de gama pelos operadores.

Ao analisar a imagem presente na figura 5.4 e os indicadores presentes na mesma, pode-se verificar que o *makespan* aumentou em 59% em relação ao resultado da heurística 1, e que a taxa de ocupação média reduziu 5,45 % ou seja, para nestas condições, a heurística 2 apresenta resultados significativamente piores do que a heurística 1.

5.2.4.3 Simulação cenário 1 com SPT - Heurística 1

Como foi anteriormente indicado, para comprovar o impacto que a sequência de entrada em produção tem no balanceamento, foram efectuadas duas simulações em que a ordem de entrada em produção foi definida por duas regras de despacho bem conhecidas, a SPT (*Shortest Processing*

Figura 5.3: Simulação do cenário 1 - Heurística 1

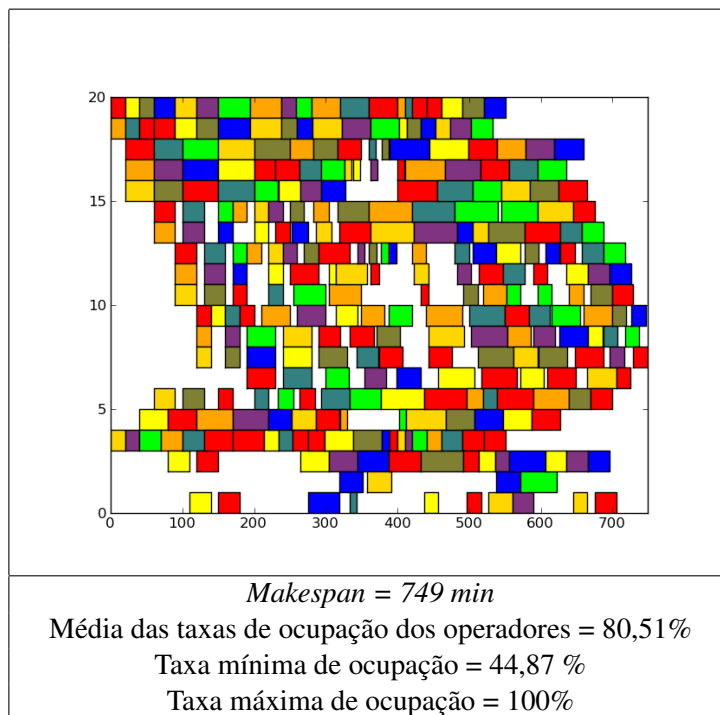
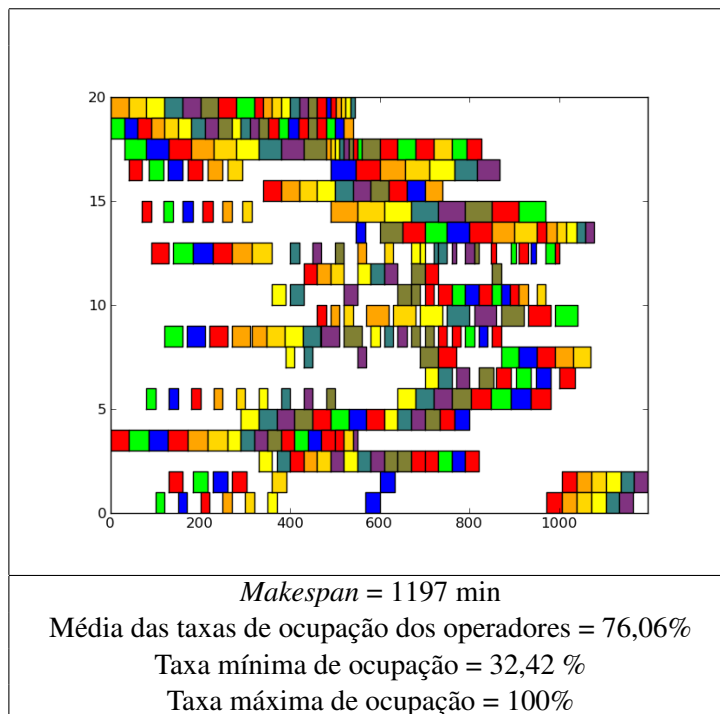


Figura 5.4: Simulação do cenário 1 - Heurística 2

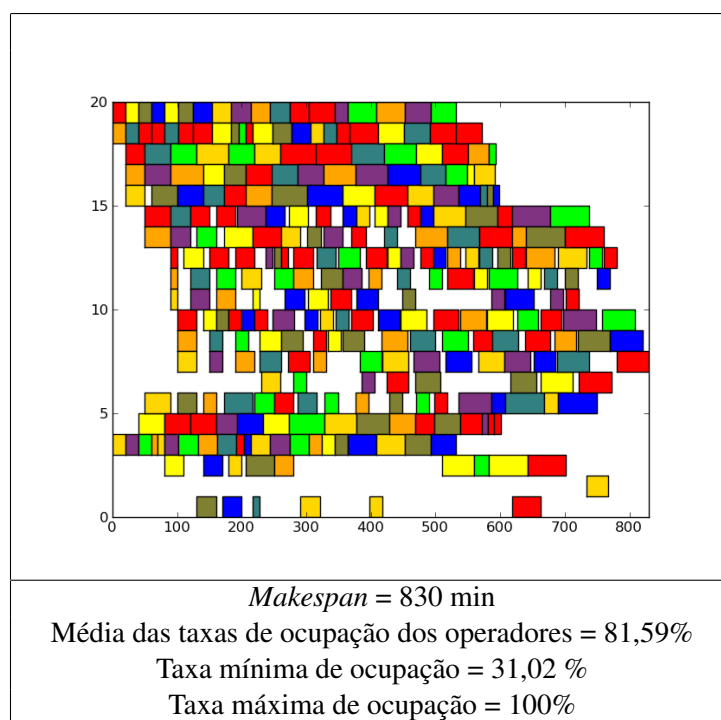


Time) e LPT (*Longest Processing Time*). O objectivo destas simulações é apenas comparar a diferença nos resultados entre o cenário 1, sem alterações, e o cenário 1 em que a ordem de entrada em produção dos lotes, é feita com uma sequência diferente.

Na simulação, cujos se apresentam na figura 5.5, foi efectuada a simulação com os dados do cenário 1, com as operações ordenadas da de menor dimensão para a de maior dimensão (SPT), na heurística 1.

Como se pode verificar nestas condições o *makespan* aumentou em 81 minutos, relativamente aos resultados do cenário 1 sem alterações também na heurística 1. Em relação a essa mesma simulação existiu uma melhoria de 1 % na taxa de ocupação média dos operadores. No entanto, a taxa de ocupação mínima foi significativamente mais baixa, tendo diminuído em 13,85%. Esta questão é notória na imagem resultante da simulação, em que os três últimos operadores têm uma carga de trabalho muito reduzida.

Figura 5.5: Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 1



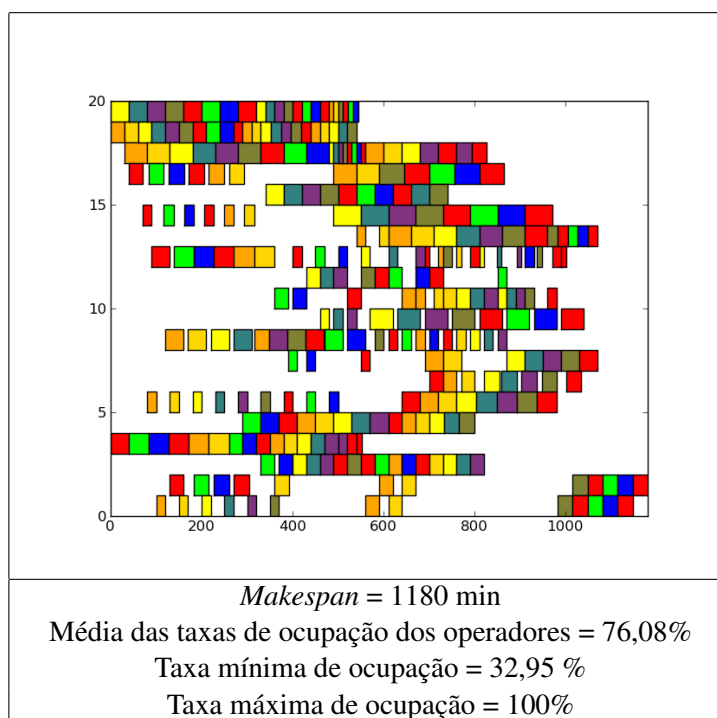
5.2.4.4 Simulação cenário 1 com SPT - Heurística 2

Tal como no cenário 1 sem alterações, foi efectuada também a simulação na heurística 2 do cenário 1 com sequência de entrada alterada segundo a regra de despacho SPT. Neste caso, como se pode verificar pelos indicadores presentes na figura 5.6, o facto de a sequência se ter alterado, praticamente não teve impacto no balanceamento.

O *makespan* aumentou em 17 minutos, em relação ao cenário 1 sem alterações, o que num valor da ordem de grandeza do obtido (*makespan*= 1180 minutos) é muito pouco significativo. Também comparando estas duas simulações, a alteração na taxa de ocupação média foi de 0,02% e a taxa de ocupação mínima aumentou em 0,53%. Como para estes indicadores a diferença é infima, pode-se concluir que o resultado do cenário 1, sem alterações e com sequenciamento obtido pela regra de despacho SPT, é em tudo semelhante, não tendo por isso impacto.

O facto de não ter existido uma melhoria significativa tem como justificação o sequenciamento em questão, pois este atribui prioridade à primeira operação disponível com a menor dimensão. Esta característica na heurística 2 vai implicar um maior número de de operações diferentes por operador.

Figura 5.6: Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 2



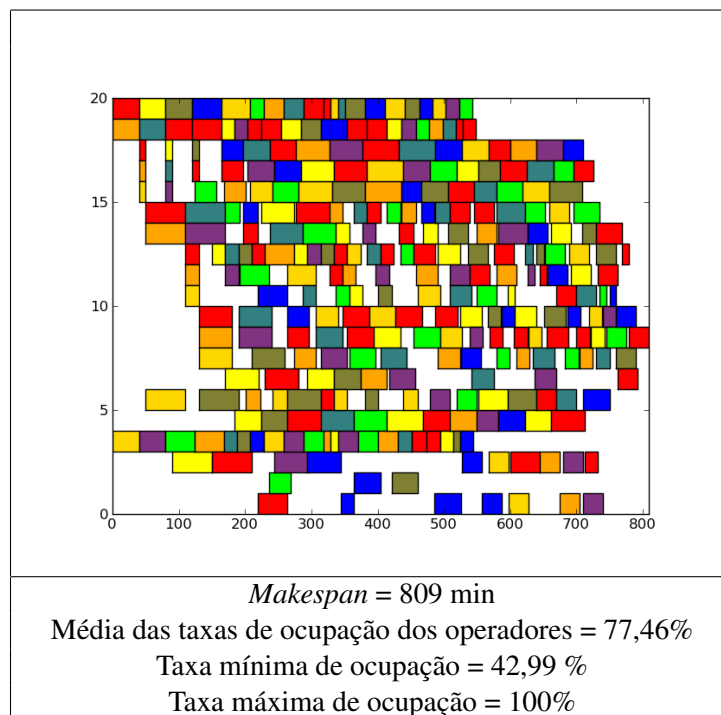
5.2.4.5 Simulação cenário 1 com LPT - Heurística 1

A simulação cujos resultados se apresentam na figura 5.7 teve como dados de entrada o cenário 1 com sequenciamento definido pela regra de despacho LPT (*Longest Processing Time*), ou seja, as operações foram ordenadas de forma decrescente em função do seu tempo de execução. Estes dados foram submitidos à heurística 1.

Foram obtidos 809 minutos de *makespan*, e a taxa média de 77,46% sendo que a taxa mínima de ocupação foi de 42,99%. Comparativamente com a simulação efectuada anteriormente, com o sequenciamento determinado pela regra de despacho SPT, na heurística 1, existiu uma melhoria no *makespan* tendo este diminuído 21 minutos não sendo no entanto uma melhoria significativa dada a ordem de grandeza dos valores em questão. A taxa de ocupação média diminuiu 4,13%, no entanto a taxa de ocupação mínima aumentou 11,97% o que indica que embora a taxa média de ocupação tenha diminuído (o que não é um bom indicador), existe menos disparidade entre a taxa de ocupação dos operadores. Ao analisar a imagem resultante da simulação pode-se verificar que os últimos 3 operadores continuam com uma carga de trabalho bastante reduzida.

Comparando o resultado das três simulações efectuadas da heurística 1, podemos concluir que o caso em que se obteve o melhor *makespan* foi o primeiro com o cenário sem alterações, no entanto a melhor taxa de ocupação foi obtida no cenário em que o sequenciamento é SPT.

Figura 5.7: Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 1



5.2.4.6 Simulação cenário 1 com LPT - Heurística 2

Da mesma forma que para o cenário 1 sem alterações, e para o cenário um com sequência de entrada em produção SPT, também neste caso, em que o sequenciamento é ditado pela regra de despacho LPT, foi efectuada a simulação na heurística 2.

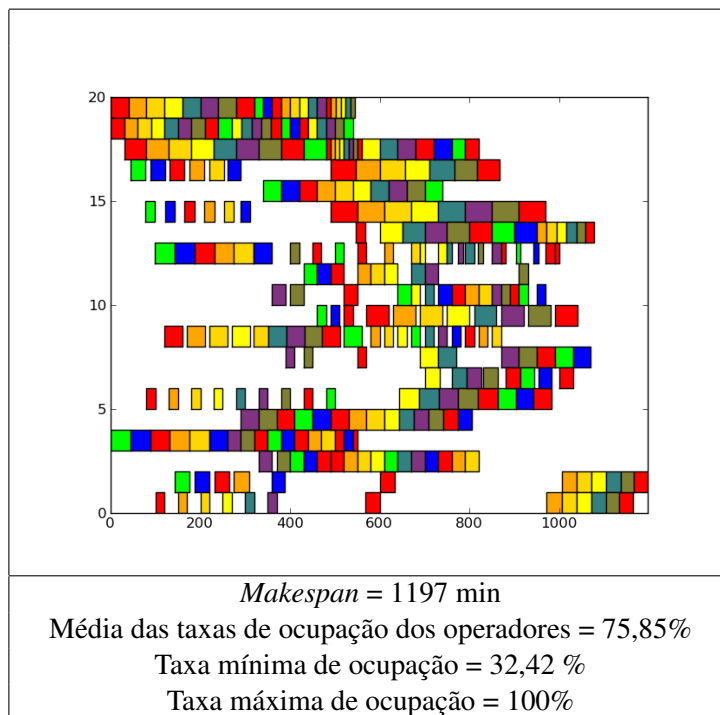
Como se pode observar na figura 5.8, os resultados obtidos são em tudo semelhantes aos resultados das duas anteriores simulações referentes à heurística 2. Os resultados da simulação deste caso e do caso em que o cenário 1 não sofreu alterações são iguais tanto no que diz respeito ao *makespan* como no que diz respeito à taxa mínima de ocupação, existindo apenas uma pequena variação na taxa de ocupação média em que se obteve um resultado 0,21% inferior.

No caso da simulação do cenário 1 com sequência de entrada SPT o *makespan* foi um pouco inferior, não sendo a diferença (17 minutos) significativa o suficiente para se poderem tecer considerações sobre qual o caso em que se obteve melhores resultados.

5.2.4.7 Simulação cenário 1 com mais polivalência - Heurística 1

Por forma perceber o impacto que a polivalência dos operadores tem no balanceamento da linha de produção, o cenário 1 foi alterado. Mantiveram-se as quantidades a produzir, gamas

Figura 5.8: Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 2



operatórias, número de operadores e número de postos no entanto, a polivalência dos operadores foi alterada, neste novo cenário todos os operadores sabem executar duas operações.

Por análise dos resultados obtidos nesta simulação da heurística 1, que se podem consultar através da figura 5.9, pode-se concluir que a polivalência dos operadores tem um impacto muito significativo.

O *makespan* é de 713 minutos, e a taxa de ocupação de 92,09% sendo que a taxa mínima de ocupação é de 79,24% e a máxima de 100% o que significa que a disparidade na taxa de ocupação dos funcionários não é muito elevada.

5.2.4.8 Simulação cenário 1 com mais polivalência - Heurística 2

Os mesmos dados, ou seja cenário 1 com maior polivalência dos operadores, foram introduzidos no simulador, mas desta vez para testar o comportamento da heurística 2.

Como se pode verificar ao analisar a figura 5.10, o *makespan* é de 1030 minutos e a taxa de ocupação média de 86,14% no entanto a taxa de ocupação mínima é de 59,45% e a máxima é de 100%, ou seja, existe uma disparidade muito grande entre a taxa de ocupação dos funcionários.

Em relação a todas as simulações efectuadas anteriormente na heurística 2, do cenário 1, cenário 1 com sequenciamento SPT e cenário 1 com sequenciamento LPT, os resultados obtidos com o facto de se aumentar polivalência aos operadores foram superiores, garantindo a produção da mesma quantidade de pares num período inferior de tempo.

Figura 5.9: Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 1

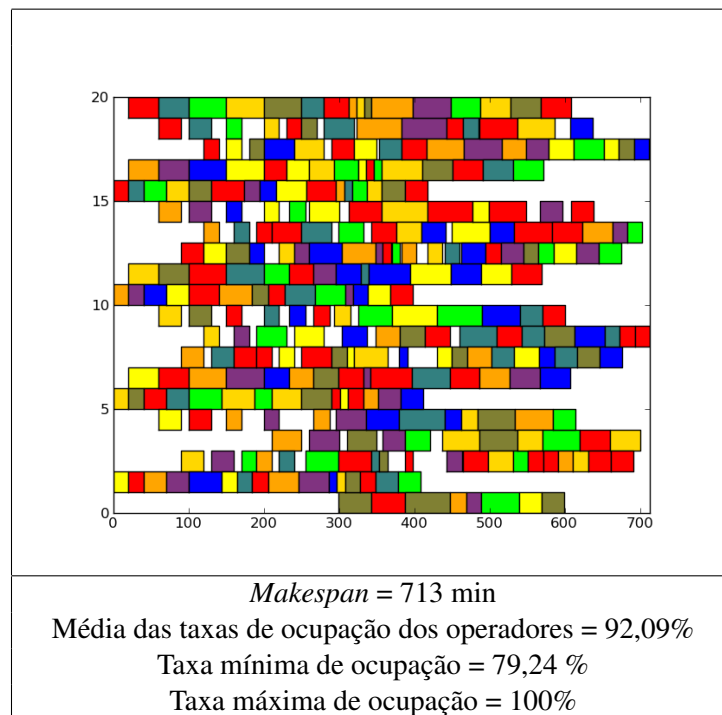
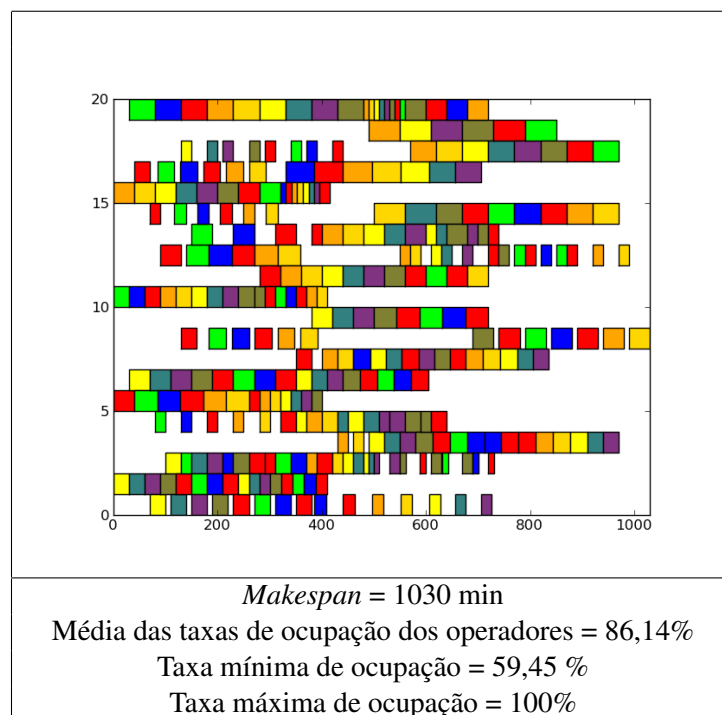


Figura 5.10: Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 2



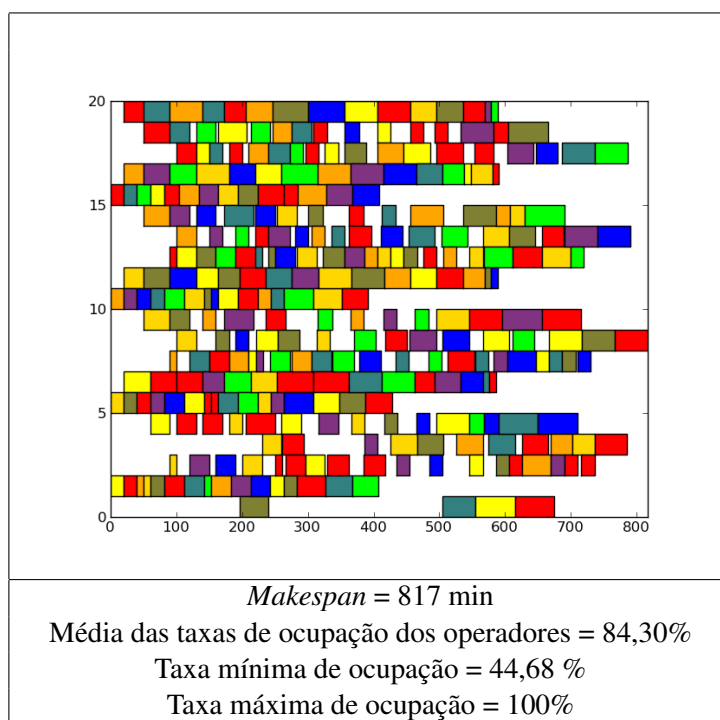
5.2.4.9 Simulação cenário 1 com SPT e mais polivalência - Heurística 1

À semelhança do que foi efectuado com o cenário 1 sem alterações, foi também efectuada a simulação do cenário 1 com operadores mais polivalentes, com alteração na sequência de entrada em produção das caixas.

A sequência de entrada em produção foi definida pela regra de despacho SPT (*Shortest Processing Time*). Esta regra de despacho atribui prioridade as operações de menor dimensão.

A figura 5.11 contém os dados desta simulação na heurística 1. Com *makespan* de 817 minutos, taxa média de ocupação 84,30%, taxa mínima de ocupação de 44,68% e máxima de 100%, pode-se concluir, que em relação ao mesmo cenário 1 com operadores mais polivalentes, os resultados desta simulação são inferiores.

Figura 5.11: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 1



5.2.4.10 Simulação cenário 1 com SPT e mais polivalência - Heurística 2

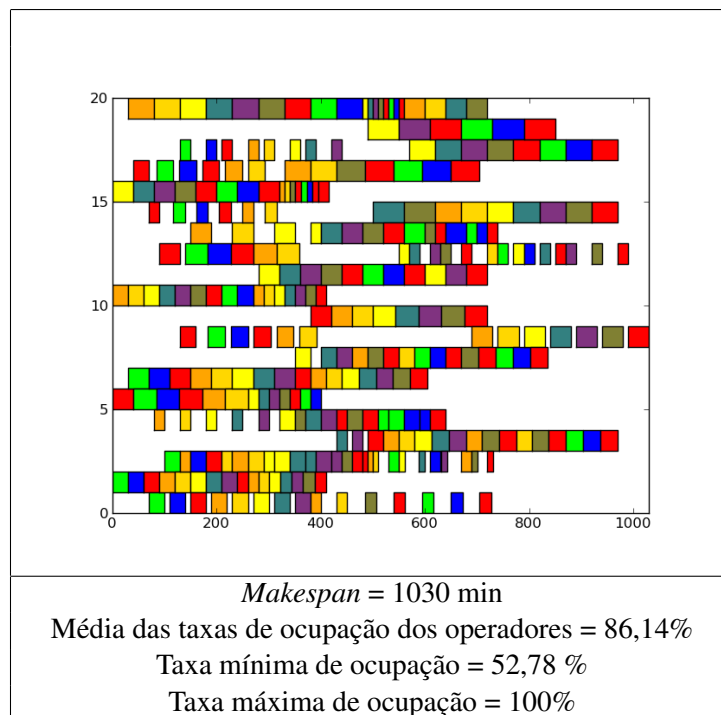
Foi efectuada a simulação na heurística 2 dos dados do cenário 1 com mais polivalência dos operadores e com sequência de entrada de produção definida pela regra de despacho SPT. Os resultados obtidos podem ser consultados na figura 5.12.

Como se pode verificar, os resultados desta simulação na heurística 2, não têm praticamente impacto quando comparados com a simulação efectuada do mesmo cenário mas com sequência definida pela ordem de entrada das encomendas.

Ao observar os resultados obtidos nesta simulação, e os resultados obtidos da simulação do cenário 1 apenas com mais polivalência dos operadores, verifica-se que o *makespan* e a taxa de

ocupação média são iguais, ou seja 1030 minutos de em ambos *makespan*, e 86,14% de taxa de ocupação máxima. O valor da taxa de ocupação mínima é neste cenário inferior em 6,66% o que faz com que, embora de forma não muito significativa, este cenário tenha resultados inferiores.

Figura 5.12: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 2



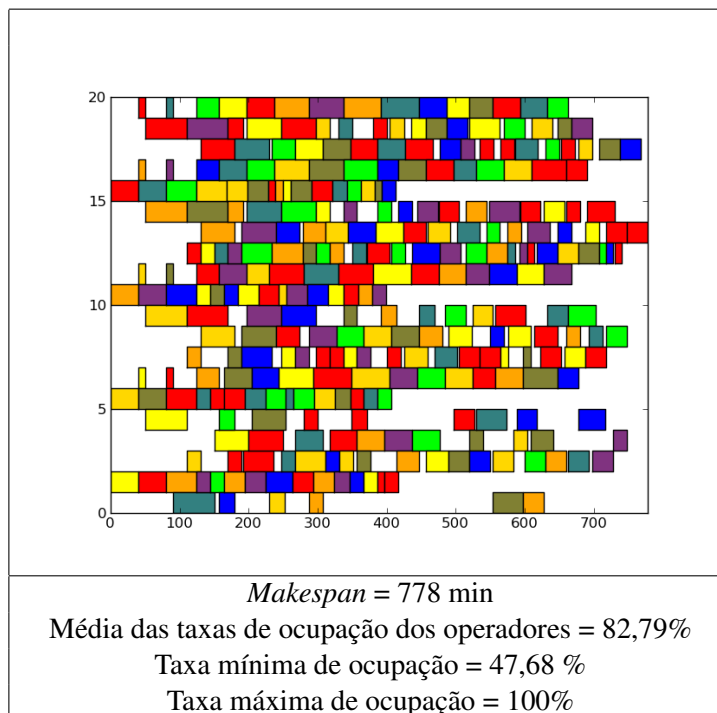
5.2.4.11 Simulação cenário 1 com LPT e mais polivalência - Heurística 1

Tal como foi efectuada no cenário 1 sem alterações, também no cenário 1 com operadores mais polivalentes foi efectuada a simulação com o sequenciamento definido pela regra de despacho LPT (*Longest Processing Time*).

Em primeiro lugar foi efectuada a simulação deste cenário na heurística 1, tendo-se obtido os resultados presentes na figura 5.13. Como se pode verificar existiu uma melhoria no *makespan*, de 39 minutos relativamente ao mesmo cenário mas com sequência de entrada em produção definida pela regra de despacho SPT. Quanto à taxa de ocupação média esta obteve valores inferiores em 1,60%.

Ao comparar as duas simulações do cenário 1 com mais polivalência de operadores, com sequência SPT e LPT, pode-se apenas tirar conclusões no que se refere ao *makespan*, visto que com sequência LPT os resultados obtidos foram superiores. No que se refere à taxa de ocupação média, mínima e máxima, as diferenças não são significativas o suficiente para se tecerem considerações.

Figura 5.13: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 1



5.2.4.12 Simulação cenário 1 com LPT e mais polivalência - Heurística 2

O cenário 1 com mais polivalência dos operadores, sequência de entrada em produção definida pela regra de despacho LPT foi submetida à simulação da heurística 2. Os resultados obtidos desta simulação estão representados na figura 5.14.

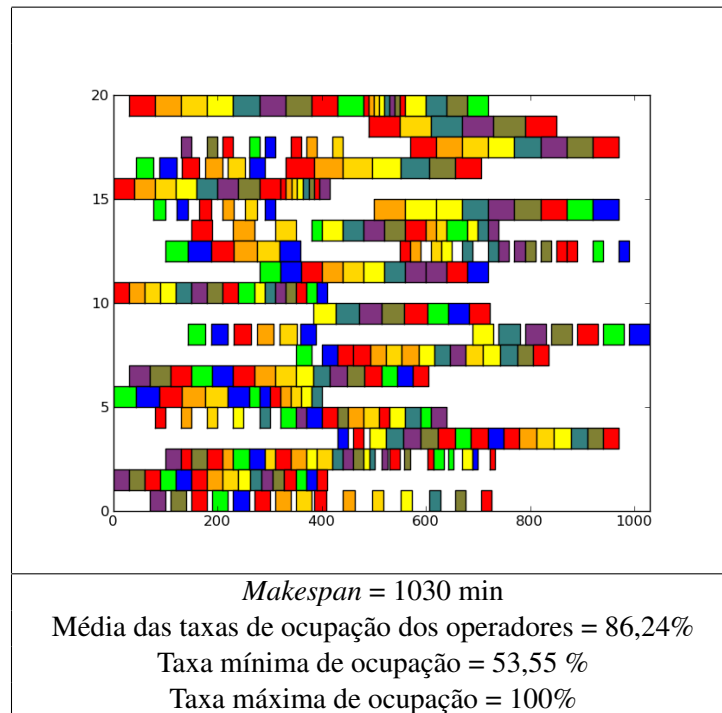
O *makespan* obtido é de 1030 minutos, a taxa de ocupação média de 86,24% , a taxa de ocupação mínima é de 53,55% e a taxa de ocupação máxima é de 100%. Ao comparar os resultados obtidos com os resultados das simulações efectuadas também na heurística 2, do cenário com mais operadores polivalentes, e do cenário com mais operadores polivalentes com sequência SPT, pode-se concluir que entre os três apresentam resultados muito semelhantes, apenas com pequenas diferenças.

5.2.4.13 Simulação cenário 1 com número teórico de postos - Heurística 1

Na figura 5.15 encontram-se os resultados referentes à simulação que se efectuou com quantidades a produzir, gamas operatórias, número de operadores e número de postos do cenário 1 como dados de entrada. O que distingue este cenário do cenário 1 são as operações que os operadores estão habilitados a fazer, ou seja, foi efectuado o cálculo do número teórico de operadores necessários por cada operação.

Para cada tipo de operação é verificado quanto tempo de execução é necessário para produzir a quantidade total especificada de pares de sapatos. O valor obtido para cada tipo de operação é dividido pelas horas que cada operador tem disponível por dia. Obtem-se assim o valor teórico

Figura 5.14: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 2



de postos necessários para produzir a quantidade especificada de pares de sapatos em 480 horas, no caso de não existirem relações de precedência.

Estes dados foram submetidos a simulação da heurística 1, tendo os resultados, como seria de esperar, sido bastante bons. O *makespan* é de 720, e a taxa média de ocupação são 93,25%. A taxa mínima de ocupação são 76,61% e a taxa de ocupação máxima é de 100%, ou seja, a variação entre as taxas de ocupação dos operadores é reduzida.

Como se pode observar na imagem obtida do simulador, as operações estão bastante condensadas, existindo reduzidos espaços em branco (que significam o tempo de não trabalho dos operadores).

5.2.4.14 Simulação cenário 1 com número teórico de postos - Heurística 2

Tal como nos restantes casos, os dados referentes ao cenário utilizado na simulação anteriormente descrita, foram também submetidos à simulação da heurística 2. Nesta simulação o *makespan* obtido, de 960 minutos, comparado com as simulações anteriores da heurística 2, é o mais reduzido.

A taxa média de ocupação dos operadores é de 89,31% , sendo este também o melhor resultado obtido para a heurística 2 de todas as simulações efectuadas.

Comparando os resultados obtidos, com os mesmos dados de entrada, a heurística 2 continua a ter uma performance inferior à heurística 1. Este facto pode verificar-se facilmente observando as imagens que o simulador retornou das duas simulações.

Figura 5.15: Simulação do cenário 1 com nº teórico de postos necessários - Heurística 1

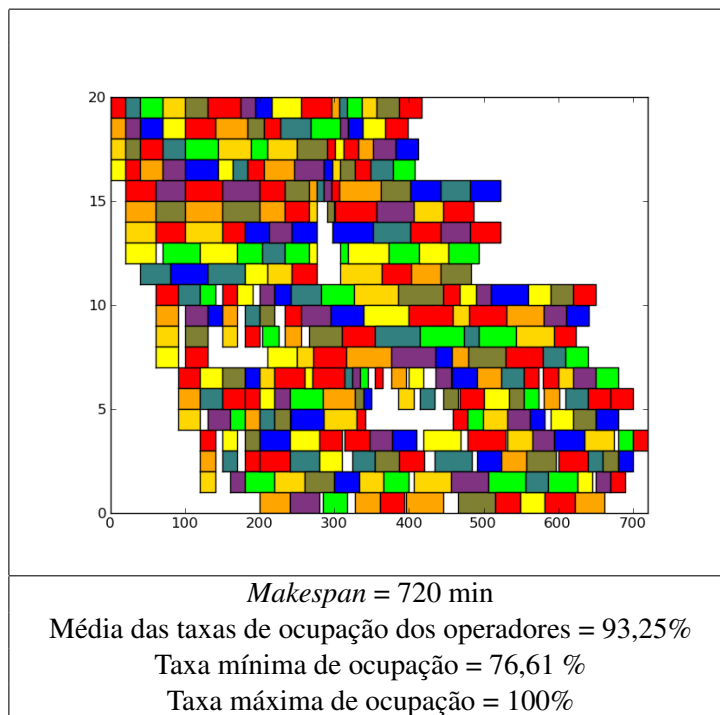
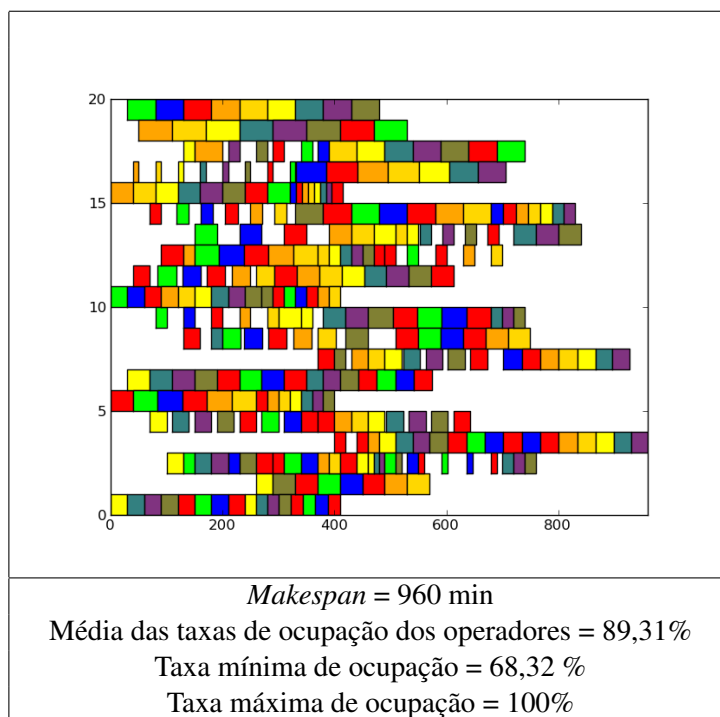


Figura 5.16: Simulação do cenário 1 com nº teórico de postos necessários - Heurística 2



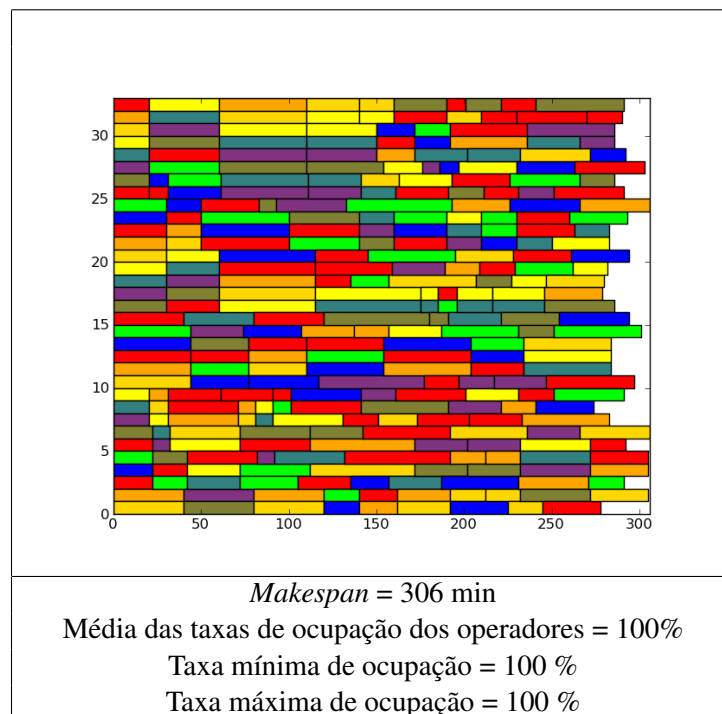
5.2.4.15 Simulação cenário 1 com operadores e máquinas totalmente polivalentes - Heurística 1

A simulação cujos resultados se encontram na figura 5.17 teve como dados de entrada as quantidades a produzir, gamas operatórias, número de operadores e número de postos. O que faz deste cenário utópico, pelo menos para o problema sobre o qual se desenvolveu o sistema, é o facto de todos os operadores estarem aptos a executar todas as operações, e todas as operações poderem ser executadas em todos os postos.

Com esta simulação, pretendeu-se demonstrar apenas o comportamento de ambas as heurísticas e do simulador perante este cenário. O resultado obtido foi o esperado, a taxa de ocupação média é 100%, portanto o *makespan* obtido, 306 minutos representa o período mais curto de tempo em que é possível produzir a quantidade especificada, com os recursos disponibilizados.

A imagem obtida do simulador, suporta os indicadores obtidos, ou seja como seria de esperar não existem espaços em branco, ou seja, não existem períodos de não trabalho.

Figura 5.17: Simulação do cenário 1 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes



Na tabela 5.6 encontra-se um resumo dos resultados obtidos na pela simulação do cenário 1 com todas as suas variações. A negrito encontram-se os melhores resultados obtidos, sendo que estes ocorreram na simulação do cenário 1 com mais polivalência, e com número teórico de postos. Podemos também verificar que a Heurística 2 apresenta sempre piores resultados do que a Heurística 1.

Tabela 5.6: Resultados obtidos na simulação do cenário 1

	Heurística 1		Heurística 2	
	Makespan (minutos)	Taxa média de ocupação	Makespan (minutos)	Taxa média de ocupação
Cenário 1	749	80,51 %	1197	76,06 %
Com SPT	830	81,59 %	1180	76,08 %
Com LPT	809	77,46 %	1197	75,85 %
Polivalência	713	92,09 %	1030	86,14 %
Polivalência SPT	817	84,30 %	1030	86,14 %
Polivalência LPT	778	82,79 %	1030	86,24 %
Nº Teórico	720	93,95 %	960	89,31 %

5.2.5 Simulação do Cenário 2

Como foi dito anteriormente, a heurística 2 não representou uma melhoria para a heurística 1, motivo pela qual foi desenvolvida. Esta conclusão foi tirada, não apenas pelas simulações descritas nesta dissertação mas também por muitas outras, com cenários distintos, que foram desenvolvidas no decorrer deste trabalho. Desta forma a simulação do cenário 2, que representa a realidade da empresa, será apenas efectuada com recurso à heurística 1.

5.2.5.1 Simulação cenário 2 - Heurística 1

A primeira simulação foi efectuada com os dados correspondentes à descrição feita anteriormente, na secção 5.2.2. para esta simulação não foi realizada nenhuma alteração ao cenário.

Os resultados obtidos desta simulação estão expostos na figura 5.18 onde se pode verificar que para produzir 1500 pares de sapatos de 25 modelos diferentes, desde o início da primeira operação até à conclusão da última são necessários 1412,2 minutos, sendo que a taxa de ocupação média é de 59,48%.

Embora o *makespan*, não seja muito elevado, não pode ser considerado razoável, tal como a taxa de ocupação média que é de 59,48%. Esta taxa tem este valor porque, embora existam operadores com taxa de ocupação média de 100%, existem também operadores com taxa de ocupação de valores que rondam os 15%.

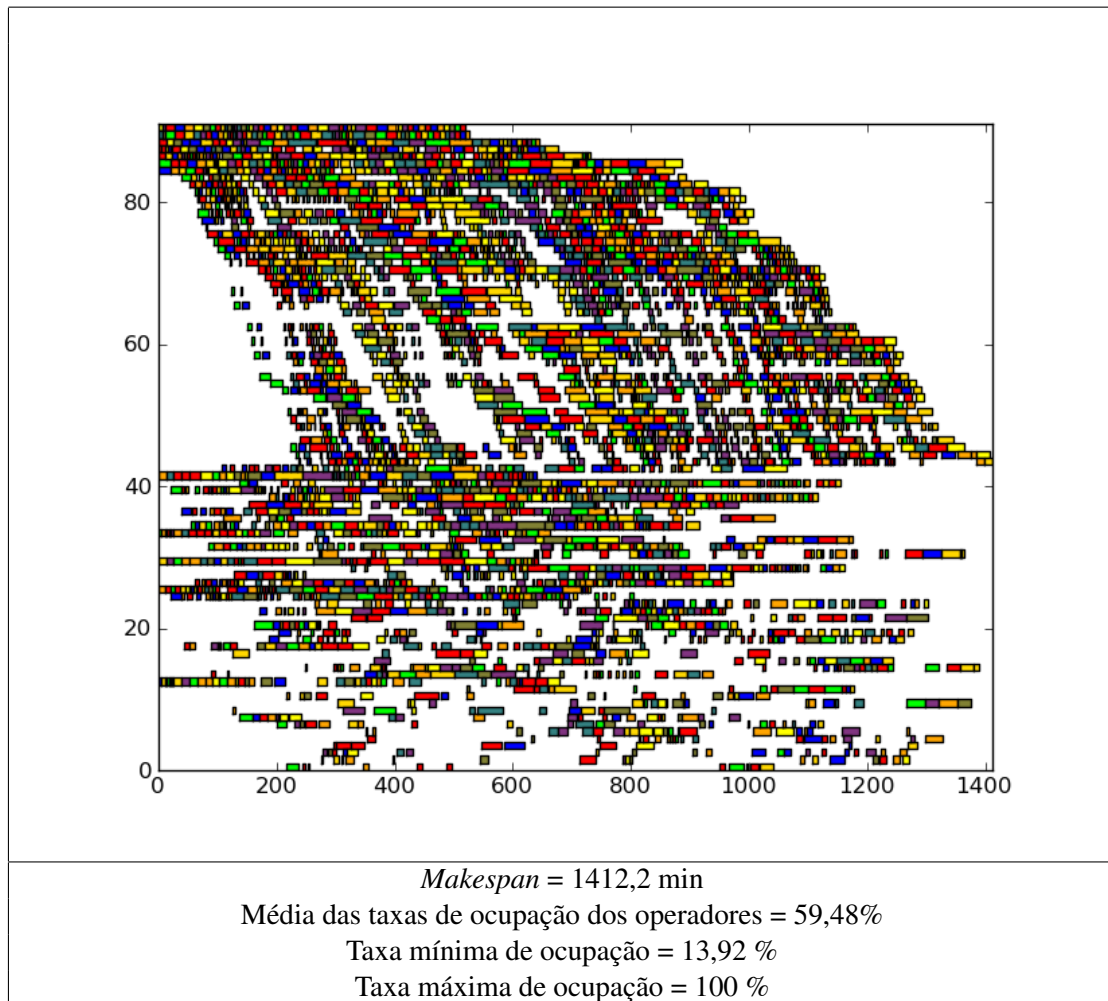
Ao analisar a imagem que o simulador exportou, pode-se verificar que os operadores responsáveis pelo último grupo de operações das gamas, são os operadores com taxa média de ocupação mais baixa, pois entre cada operação que executam existe um tempo de não trabalho significativo.

5.2.5.2 Simulação cenário 2 com mais polivalência - Heurística 1

Tal como na simulação do cenário 1 (secção 5.2.4), também para este cenário, cuja dimensão se assemelha à realidade da empresa piloto, foi efectuada a simulação com acréscimo de polivalência aos funcionários. Para esta simulação assumiu-se que metade dos operadores eram polivalentes.

Como se pode verificar através da figura 5.19 existiram melhorias significativas com esta alteração, o *makespan* reduziu em 139 minutos e embora os resultados da taxa de ocupação mínima

Figura 5.18: Simulação do cenário 2



e média não possam ser considerados razoáveis, existiu uma melhoria significativa também neste indicador.

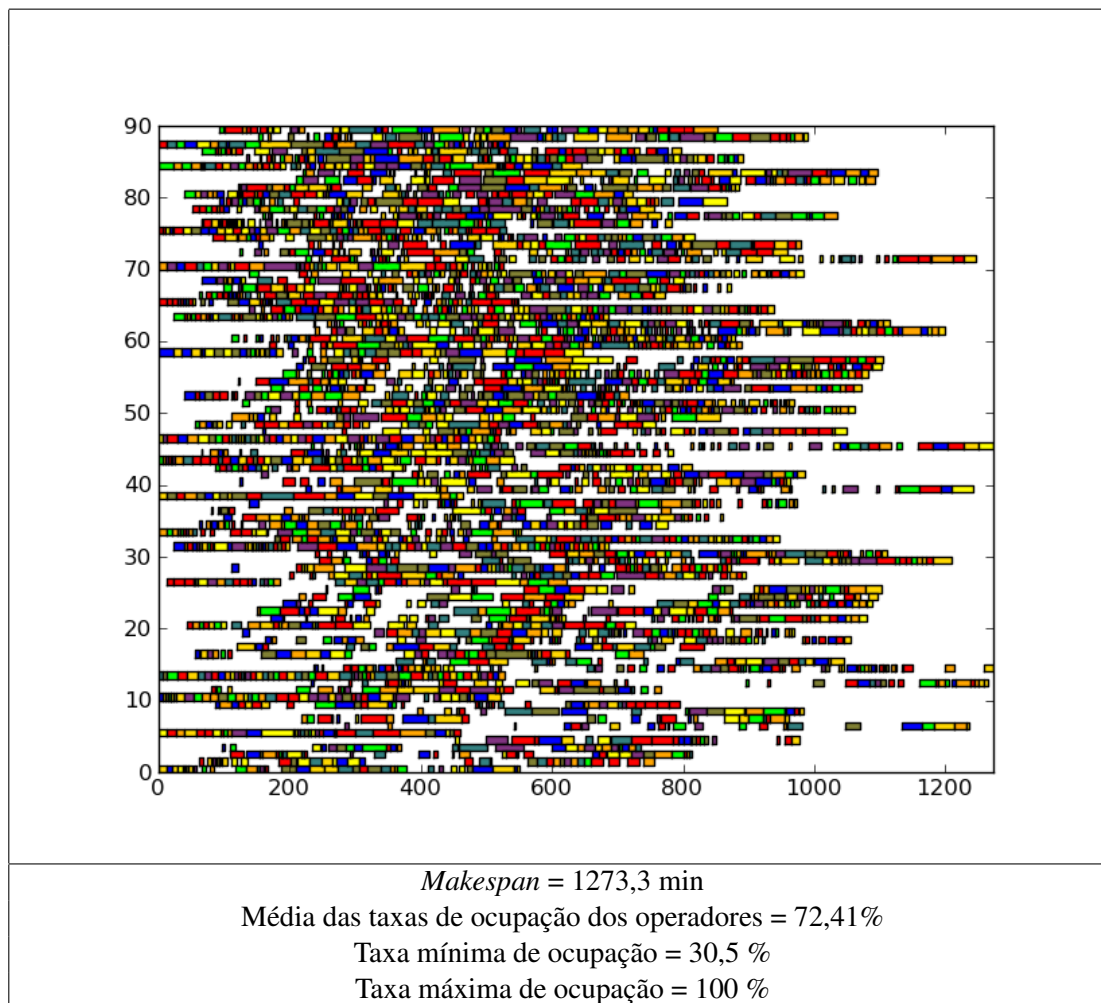
Como se pode observar através da imagem obtida pelo simulador pode-se concluir que existem menos espaços em branco, o que indica que desde que um operador inicia a sua primeira operação até que conclui a execução da sua última operação, existe menos tempo de não trabalho.

5.2.5.3 Simulação cenário 2 com número teórico de postos - Heurística 1

Para verificar se existem melhorias nos resultados obtidos, foi submetido a simulação um cenário cujos dados são semelhantes aos do cenário 2. Apenas são alteradas as características dos operadores e postos, de forma a que existam operadores e postos com características que satisfaçam o número teórico de postos/operadores que foi calculado.

Para cada tipo de operação é verificado quanto tempo de execução é necessário para produzir a quantidade total especificada de pares de sapatos. O valor obtido para cada tipo de operação é

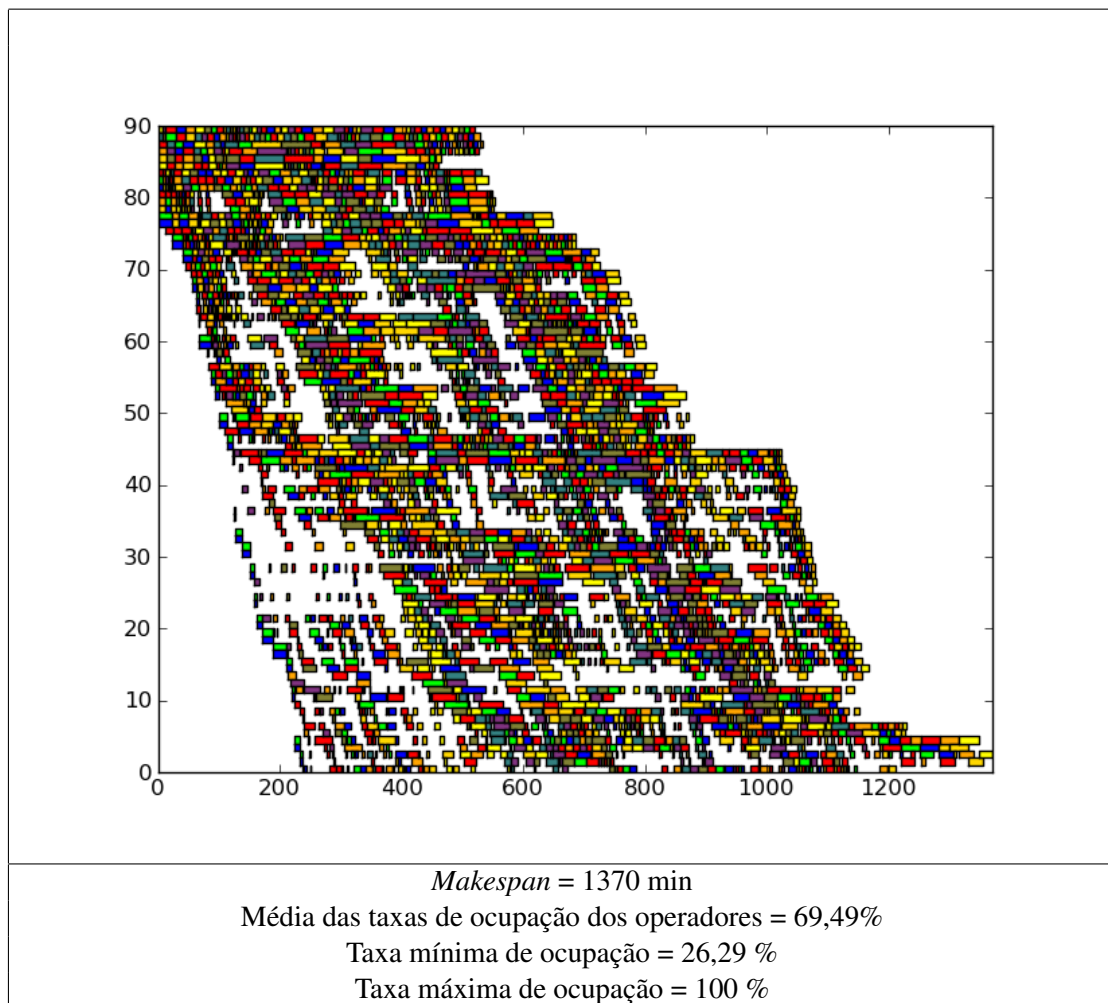
Figura 5.19: Simulação do cenário 2 com mais polivalência



dividido pelas horas que cada operador tem disponível por dia. Obtem-se assim o valor teórico de postos necessários para produzir a quantidade especificada de pares de sapatos em 480 horas, no caso de não existirem relações de precedência. Estes valores obtidos serviram como dados de entrada para a heurística 1, na simulação cujos resultados se podem consultar na figura 5.20.

Ao analisar os resultados obtidos pode-se verificar que o *makespan* em relação ao cenário 2 sem alterações apresenta uma melhoria de 42 minutos, e a taxa de ocupação média um aumento de 10%. O motivo pelo qual este cenário não obteve resultados melhores prende-se com o facto de se fazerem aproximações e arredondamentos quando se faz o cálculo do número mínimo de postos. Estes arredondamentos quer para o valor a cima, quer para o valor a baixo, vão causar tempo de não trabalho como se pode verificar pela imagem exportada pelo operador.

Figura 5.20: Simulação do cenário 2 com nº teórico de postos



5.2.5.4 Simulação cenário 2 com operadores e máquinas totalmente polivalentes - Heurística 1

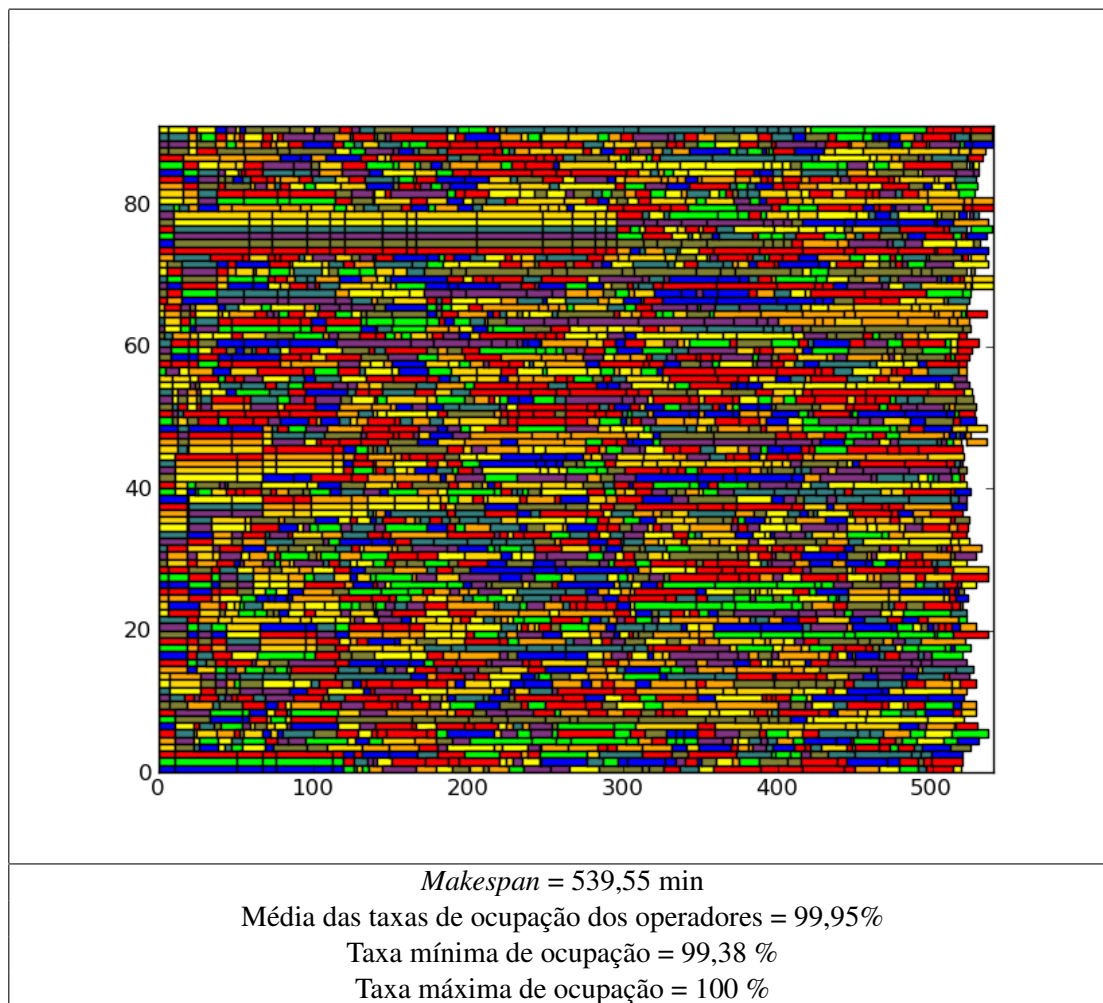
A última simulação, tal como foi efectuada para o cenário 1, representa uma situação que no caso em estudo se torna impraticável. Em relação ao cenário 2, as alterações prendem-se com os operadores e os postos. Neste caso, tanto operadores como postos são capazes de executar qualquer tipo de operação. Esta simulação devolve a melhor situação possível para produzir a quantidade especificada.

O tempo necessário para produzir os 1500 pares de sapatos são 540 minutos e a taxa de ocupação média ronda os 100%.

5.2.6 Discussão dos resultados das simulações

Ao analisar todas as simulações efectuadas para ambos os cenários, pode-se efectuar comparações de forma a tirar algumas conclusões.

Figura 5.21: Simulação do cenário 2 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes



Como se pode verificar, a heurística 2, desenvolvida na tentativa de melhorar a heurística 1, apresenta sempre resultados piores do que a heurística 1. A justificação encontrada para esta situação, prende-se com o facto de esta heurística 2, restringir os operadores à execução das operações de gama que lhe estão associadas, não podendo executar operações que estão habilitados a executar se forem de outras gamas, ou seja, enquanto as encomendas que contêm as operações a eles associadas não entrarem em produção, os operadores estão em tempo de não trabalho.

Quanto às várias simulações efectuadas, podemos concluir que quando se atribui mais polivalência aos operadores os resultados melhoram significativamente. Podemos também confirmar que, a sequência de entrada em produção tem impacto nos resultados do balanceamento.

Por fim, pode-se verificar que quando a dimensão do problema aumenta, os resultados obtidos perdem qualidade. Os resultados obtidos não poderam ser comparados com os resultados reais da empresa piloto pois não existem registos da produção, uma vez que a empresa se encontra a fazer alterações ao seu sistema produtivo.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

No presente e último capítulo, encontram-se descritas as conclusões referentes a todo o trabalho efectuado no decorrer do projecto que deu origem a esta dissertação. São tecidas considerações sobre a satisfação dos objectivos inicialmente propostos, e por fim são efectuadas sugestões para trabalho futuro.

6.1 Conclusão

Esta dissertação enquadrou-se num projecto de I&D, a decorrer no INESC Porto, com uma fortíssima ligação à indústria do calçado. Cumpriu-se o objectivo principal, a concepção e o desenvolvimento de um sistema base de balanceamento de linhas de produção que pudesse vir a ser usado, após validação, na empresa associada a este trabalho. Mais especificamente, tratar-se-ia da sua integração com o transportador provido de algoritmo próprio de gestão logística e em actual funcionamento.

O desenvolvimento deste sistema envolveu os seguintes aspectos cruciais subjacentes:

- Levantamento e descrição detalhada do problema da empresa piloto;
- Conceptualização do sistema de balanceamento da linha de produção;
- Programação do sistema numa linguagem de programação;
- Simulação das soluções obtidas para diversos cenários representativos da realidade de produção da empresa piloto, que sustente o benefício da sua implementação e integração no sistema de gestão do sistema logístico para costura.

O primeiro destes objectivos foi atingido com sucesso, foi efectuado o levantamento e estruturação do problema. O problema é bastante complexo, consiste numa linha de produção de calçado na secção de costura, a qual deve ser balanceada correctamente de forma a poder responder à

actual procura dentro das datas previstas. O balanceamento que consiste na distribuição de operações pelos postos, tinha neste como objetivos reduzir o tempo de não trabalho, e garantir que os operadores têm a mesma carga de trabalho.

Após a conclusão do levantamento e estruturação do problema, foi efectuada a conceptualização do sistema de balanceamento da linha de produção. Foi desenvolvida uma primeira heurística, a heurística 1, que é responsável distribuição das super-operações pelos operadores tendo em consideração a sua polivalência e os postos existentes. Foi desenvolvida seguidamente, uma outra heurística, a heurística 2, que se alimenta da heurística 1, e que é responsável pela distribuição das operações que formam uma super-operação, pelos operadores que lhe estão associados.

Em paralelo com o desenvolvimento das heurísticas para o problema considerado, foram formulados modelos matemáticos de optimização relacionados, que também facilitaram uma melhor discussão de resultados. O modelo 1 tem como objectivo a minimização do tempo de não trabalho dos operadores, já o modelo 2 tem como objectivo minimizar o número distinto de operações de gamas distintas. Foi efectuada a programação matemática dos modelos, estes apresentaram a solução óptima segundo estes objectivos para um cenário de pequena dimensão.

Ambas as heurísticas foram programadas, tendo sido desenvolvido também um simulador. O simulador pretende representar o comportamento do transportador instalado na empresa piloto. Depois de efectuadas várias simulações, pode-se chegar à conclusão que a heurística 2, desenvolvida com o objectivo de melhorar o resultado da heurística 1, não o faz. O motivo pelo qual isto acontece está relacionado com o sequenciamento de entrada em produção das caixas e com o algoritmo interno do transportador.

O sistema desenvolvido, além de ser um sistema de balanceamento de linhas de produção, serve também como sistema de apoio à decisão, permitindo ao decisor, por análise de simulações do que pretende produzir, identificar estrangulamentos, verificar quando consegue realmente ter os produtos acabados e desta forma intervir.

6.2 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro sugere-se o teste e validação cuidados dos modelos e heurísticas desenvolvidos, no enquadramento e propósitos em que foram desenhados.

A situação mais geral de balanceamento, no ambiente amplo da produção na empresa do calçado em estudo, é complexa, de difícil clarificação e estruturação. Daí que, e também como trabalho futuro, e apoiados na experiência adquirida, será aconselhável conceber algum sistema mais ‘realista’, robusto e completo, o que a duração deste projecto não permitiria realizar.

Na revisão da literatura foi identificado o sequenciamento como factor importante para se tirar o melhor partido do balanceamento efectuado, assim sugere-se trabalho futuro no sequenciamento das encomendas que forma a que o sistema se torne ainda mais completo e eficiente.

O problema de balanceamento de linhas de produção é uma tema muito vasto e no qual existe muito por investigar ainda, nomeadamente na fileira da indústria do calçado, relativamente à qual não se encontraram publicações científicas relevantes.

Anexo A

Programação matemática

Neste anexo encontra-se o código dos modelos matemáticos 1 e 2 que foi introduzido no GLPK (*GNU Linear Programming Kit*).

A.1 Código do modelo 1

```
# Conjunto de operadores:
set I;
# Conjunto de postos:
set J;
# Conjunto de operações:
set K;
# Tempo necessário por operação:
param tk in K;
# Tempo disponível por operador:
param td;
# Compatibilidade operador i, posto j, operação k
param wi in I, j in J, k in K, binary;
# Variável auxiliar:
var Yk in K;
# Variável associação operador i, posto j, operação k
var Xi in I, j in J, k in K, binary;
# A função objectivo idealmente seria:
# sumk in K abs(t[k]- td * sumi in I, j in J X[i,j,k])
#contudo o glpk não permite funções objectivo não lineares pelo se modelou com a variavel
Y e restrições adicionais r5 e r6.
minimize cost: sumk in K Y[k];
# garante que todos os operadores são associados a um posto e uma operação
```

```

s.t. r1i in I: sumj in J, k in K X[i,j,k] = 1;
# garante que a associacao so e efectuada se existir compatibilidade
s.t. r2i in I, j in J, k in K: X[i,j,k] - w[i,j,k] <= 0;
# garante que todas as operacoes sao realizadas
s.t. r3k in K: sumi in I, j in J X[i,j,k] >= 1;
# garante que associamos no maximo um par operador/operacao a cada posto:
s.t. r4j in J: sumi in I, k in K X[i,j,k] <= 1;
# as seguintes restrições modelam a função abs()
s.t. r5k in K: Y[k] >= t[k] - td * sumi in I, j in J X[i,j,k];
s.t. r6k in K: Y[k] >= (td * sumi in I, j in J X[i,j,k]) - t[k];

```

A.2 Código do modelo 2

```

# numero de operadores
param M;
# numero de operações
param N;
# "tamanho" de cada operação
param li in 1..N >= 0;
# capacidade de cada operador
param C;
# parametro auxiliar
param BM;
# quantidade da operação j associado ao operador i
var yi in 1..M, j in 1..N >= 0;
# variavel para efectuar a contagem das operações associados a cada operação
var xi in 1..M, j in 1..N, binary;
# garante que todos as operações sao associados a pelo menos um operador
s.t. r1j in 1..N: sumi in 1..M yi[i,j] = li[j];
# garante que não excedemos a capacidade de cada operador
s.t. r2i in 1..M: sumj in 1..N yi[i,j] <= C;
# restrição para determinar o valor da variável X
s.t. r3i in 1..M, j in 1..N: yi[i,j] <= BM * xi[i,j];
# objectivo: minimizar o número de operações diferentes associados a cada operador
minimize cost: sumi in 1..M, j in 1..N xi[i,j];

```


Anexo B

Resultados das simulações

Neste anexo encontram-se as tabelas geradas pelo simulador, com o resultado das simulações efectuadas para o cenário 1

Tabela B.1: Simulação do cenário 1 - Heurística 1

Makespan	749	min				
	início	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	551	551	551	0	100
mach 1	0	533	533	533	0	100
mach 2	20	659	639	619	20	96,87
mach 3	20	636	616	571	45	92,69
mach 4	20	665	645	571	74	88,53
mach 5	60	675	615	536	79	87,15
mach 6	60	687	627	532	95	84,85
mach 7	90	717	627	473	154	75,44
mach 8	90	726	636	418	218	65,72
mach 9	90	729	639	372	267	58,22
mach 10	120	746	626	539	87	86,1
mach 11	120	737	617	479	138	77,63
mach 12	120	749	629	459	170	72,97
mach 13	190	725	535	409	126	76,45
mach 14	60	699	639	550	89	86,07
mach 15	40	627	587	514	73	87,56
mach 16	0	551	551	551	0	100
mach 17	80	696	616	492	124	79,87
mach 18	319	622	303	149	154	49,17
mach 19	110	705	595	267	328	44,87
					Média	80,508

Tabela B.2: Simulação do cenário 1 - Heurística 2

Makespan	1197	min				
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	545	545	545	0	100
mach 1	0	540	540	540	0	100
mach 2	30	826	796	796	0	100
mach 3	40	866	826	570	256	69,01
mach 4	340	740	400	400	0	100
mach 5	70	970	900	610	290	67,78
mach 6	546	1078	532	500	32	93,98
mach 7	90	1001	911	545	366	59,82
mach 8	430	870	440	260	180	59,09
mach 9	360	970	610	380	230	62,3
mach 10	460	1040	580	460	120	79,31
mach 11	120	870	750	593	157	79,07
mach 12	390	1070	680	340	340	50
mach 13	700	1034	334	255	79	76,35
mach 14	80	980	900	520	380	57,78
mach 15	290	799	509	509	0	100
mach 16	0	550	550	550	0	100
mach 17	330	820	490	480	10	97,96
mach 18	130	1197	1067	387	680	36,27
mach 19	100	1164	1064	345	719	32,42
					Média	76,057

Tabela B.3: Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 1

Makespan	830	min				
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	532	532	532	0	100
mach 1	0	571	571	571	0	100
mach 2	20	593	573	573	0	100
mach 3	20	592	572	572	0	100
mach 4	20	599	579	569	10	98,27
mach 5	50	738	688	620	68	90,12
mach 6	50	760	710	604	106	85,07
mach 7	90	780	690	567	123	82,17
mach 8	90	770	680	467	213	68,68
mach 9	90	722	632	331	301	52,37
mach 10	100	808	708	615	93	86,86
mach 11	100	820	720	572	148	79,44
mach 12	100	830	730	532	198	72,88
mach 13	230	772	542	283	259	52,21
mach 14	50	750	700	540	160	77,14
mach 15	40	601	561	561	0	100
mach 16	0	532	532	532	0	100
mach 17	80	702	622	346	276	55,63
mach 18	734	767	33	33	0	100
mach 19	130	662	532	165	367	31,02
					Média	81,593

Tabela B.4: Simulação do cenário 1 com SPT- Heurística 2

Makespan	1180	min				
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	544	544	544	0	100
mach 1	0	540	540	540	0	100
mach 2	30	826	796	796	0	100
mach 3	40	865	825	570	255	69,09
mach 4	340	740	400	400	0	100
mach 5	70	970	900	610	290	67,78
mach 6	540	1070	530	500	30	94,34
mach 7	90	1001	911	545	366	59,82
mach 8	430	870	440	260	180	59,09
mach 9	360	980	620	380	240	61,29
mach 10	460	1040	580	460	120	79,31
mach 11	120	870	750	593	157	79,07
mach 12	390	1070	680	340	340	50
mach 13	700	1034	334	255	79	76,35
mach 14	80	980	900	520	380	57,78
mach 15	290	799	509	509	0	100
mach 16	0	551	551	551	0	100
mach 17	330	820	490	480	10	97,96
mach 18	130	1180	1050	387	663	36,86
mach 19	100	1147	1047	345	702	32,95
					Média	76,0845

Tabela B.5: Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 1

Makespan	809					
	início	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	543	543	543	0	100
mach 1	0	548	548	548	0	100
mach 2	40	710	670	576	94	85,97
mach 3	40	725	685	584	101	85,26
mach 4	40	709	669	587	82	87,74
mach 5	50	735	685	612	73	89,34
mach 6	50	769	719	550	169	76,5
mach 7	110	779	669	552	117	82,51
mach 8	110	762	652	423	229	64,88
mach 9	110	760	650	331	319	50,92
mach 10	130	790	660	548	112	83,03
mach 11	130	809	679	539	140	79,38
mach 12	130	789	659	479	180	72,69
mach 13	170	792	622	356	266	57,23
mach 14	50	750	700	544	156	77,71
mach 15	184	712	528	528	0	100
mach 16	0	544	544	544	0	100
mach 17	90	732	642	404	238	62,93
mach 18	236	461	225	113	112	50,22
mach 19	219	740	521	224	297	42,99
					Média	77,465

Tabela B.6: Simulação do cenário 1 com LPT- Heurística 2

Makespan	1197					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	545	545	545	0	100
mach 1	0	540	540	540	0	100
mach 2	30	820	790	790	0	100
mach 3	44	866	822	570	252	69,34
mach 4	340	740	400	400	0	100
mach 5	77	970	893	610	283	68,31
mach 6	546	1078	532	500	32	93,98
mach 7	99	1000	901	545	356	60,49
mach 8	430	930	500	260	240	52
mach 9	360	970	610	380	230	62,3
mach 10	460	1040	580	460	120	79,31
mach 11	120	870	750	593	157	79,07
mach 12	390	1070	680	340	340	50
mach 13	701	1030	329	255	74	77,51
mach 14	80	983	903	520	383	57,59
mach 15	290	805	515	515	0	100
mach 16	0	550	550	550	0	100
mach 17	330	820	490	480	10	97,96
mach 18	143	1197	1054	387	667	36,72
mach 19	100	1164	1064	345	719	32,42
					Média	75,85

Tabela B.7: Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 1

Makespan	713					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	20	608	588	588	0	100
mach 1	60	637	577	472	105	81,8
mach 2	120	712	592	559	33	94,43
mach 3	20	571	551	551	0	100
mach 4	0	417	417	417	0	100
mach 5	60	638	578	458	120	79,24
mach 6	120	703	583	525	58	90,05
mach 7	90	675	585	543	42	92,82
mach 8	20	569	549	549	0	100
mach 9	0	398	398	398	0	100
mach 10	60	600	540	440	100	81,48
mach 11	120	713	593	505	88	85,16
mach 12	90	676	586	501	85	85,49
mach 13	20	607	587	587	0	100
mach 14	0	412	412	412	0	100
mach 15	60	614	554	440	114	79,42
mach 16	210	700	490	446	44	91,02
mach 17	90	691	601	486	115	80,87
mach 18	0	408	408	408	0	100
mach 19	299	599	300	300	0	100
					Média	92,089

Tabela B.8: Simulação do cenário 1 com mais polivalência- Heurística 2

Makespan	1030					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	30	720	690	690	0	100
mach 1	490	850	360	360	0	100
mach 2	130	970	840	560	280	66,67
mach 3	40	706	666	570	96	85,59
mach 4	0	415	415	415	0	100
mach 5	70	970	900	600	300	66,67
mach 6	150	740	590	480	110	81,36
mach 7	90	990	900	540	360	60
mach 8	280	720	440	440	0	100
mach 9	0	410	410	410	0	100
mach 10	380	720	340	340	0	100
mach 11	130	1030	900	475	425	52,78
mach 12	350	835	485	465	20	95,88
mach 13	30	605	575	575	0	100
mach 14	0	400	400	400	0	100
mach 15	80	640	560	420	140	75
mach 16	430	970	540	520	20	96,3
mach 17	100	731	631	525	106	83,2
mach 18	0	410	410	410	0	100
mach 19	70	726	656	390	266	59,45
					Média	86,145

Tabela B.9: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 1

Makespan	817					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	20	589	569	569	0	100
mach 1	50	665	615	470	145	76,42
mach 2	100	787	687	569	118	82,82
mach 3	20	591	571	571	0	100
mach 4	0	408	408	408	0	100
mach 5	50	690	640	472	168	73,75
mach 6	100	790	690	542	148	78,55
mach 7	90	720	630	567	63	90
mach 8	20	589	569	569	0	100
mach 9	0	392	392	392	0	100
mach 10	50	716	666	466	200	69,97
mach 11	100	817	717	525	192	73,22
mach 12	90	730	640	522	118	81,56
mach 13	20	586	566	566	0	100
mach 14	0	428	428	428	0	100
mach 15	60	710	650	488	162	75,08
mach 16	230	786	556	399	157	71,76
mach 17	90	736	646	441	205	68,27
mach 18	0	407	407	407	0	100
mach 19	196	675	479	214	265	44,68
					Média	84,304

Tabela B.10: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e SPT- Heurística 2

Makespan	1030					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	30	720	690	690	0	100
mach 1	490	850	360	360	0	100
mach 2	130	970	840	560	280	66,67
mach 3	40	705	665	570	95	85,71
mach 4	0	415	415	415	0	100
mach 5	70	970	900	600	300	66,67
mach 6	150	740	590	480	110	81,36
mach 7	90	990	900	540	360	60
mach 8	280	720	440	440	0	100
mach 9	0	410	410	410	0	100
mach 10	380	720	340	340	0	100
mach 11	130	1030	900	475	425	52,78
mach 12	350	835	485	465	20	95,88
mach 13	30	605	575	575	0	100
mach 14	0	400	400	400	0	100
mach 15	80	640	560	420	140	75
mach 16	430	970	540	520	20	96,3
mach 17	100	731	631	525	106	83,2
mach 18	0	410	410	410	0	100
mach 19	70	727	657	390	267	59,36
					Média	86,1465

Tabela B.11: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 1

Makespan	778					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	40	663	623	559	64	89,73
mach 1	50	698	648	560	88	86,42
mach 2	130	768	638	576	62	90,28
mach 3	40	690	650	586	64	90,15
mach 4	0	413	413	413	0	100
mach 5	50	730	680	576	104	84,71
mach 6	130	778	648	551	97	85,03
mach 7	110	740	630	584	46	92,7
mach 8	40	668	628	564	64	89,81
mach 9	0	399	399	399	0	100
mach 10	50	703	653	458	195	70,14
mach 11	130	748	618	515	103	83,33
mach 12	110	718	608	462	146	75,99
mach 13	40	677	637	566	71	88,85
mach 14	0	407	407	407	0	100
mach 15	50	717	667	318	349	47,68
mach 16	150	748	598	393	205	65,72
mach 17	110	728	618	484	134	78,32
mach 18	0	416	416	416	0	100
mach 19	90	627	537	198	339	36,87
					Média	82,7865

Tabela B.12: Simulação do cenário 1 com mais polivalência e LPT- Heurística 2

Makespan	1030					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	30	720	690	690	0	100
mach 1	490	850	360	360	0	100
mach 2	130	970	840	560	280	66,67
mach 3	44	706	662	570	92	86,1
mach 4	0	415	415	415	0	100
mach 5	77	970	893	600	293	67,19
mach 6	150	740	590	480	110	81,36
mach 7	99	990	891	540	351	60,61
mach 8	280	720	440	440	0	100
mach 9	0	410	410	410	0	100
mach 10	383	723	340	340	0	100
mach 11	143	1030	887	475	412	53,55
mach 12	350	835	485	465	20	95,88
mach 13	30	605	575	575	0	100
mach 14	0	400	400	400	0	100
mach 15	80	640	560	420	140	75
mach 16	430	971	541	520	21	96,12
mach 17	100	733	633	525	108	82,94
mach 18	0	410	410	410	0	100
mach 19	70	726	656	390	266	59,45
					Média	86,2435

Tabela B.13: Simulação do cenário 1 com nº teórico de postos necessários - Heurística 1

Makespan	720					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	417	417	417	0	100
mach 1	0	398	398	398	0	100
mach 2	0	412	412	412	0	100
mach 3	0	408	408	408	0	100
mach 4	20	522	502	501	1	99,8
mach 5	20	486	466	451	15	96,78
mach 6	20	522	502	481	21	95,82
mach 7	20	493	473	431	42	91,12
mach 8	40	483	443	411	32	92,78
mach 9	60	650	590	570	20	96,61
mach 10	60	641	581	548	33	94,32
mach 11	60	624	564	502	62	89,01
mach 12	60	640	580	490	90	84,48
mach 13	90	680	590	542	48	91,86
mach 14	90	700	610	536	74	87,87
mach 15	90	680	590	452	138	76,61
mach 16	120	720	600	549	51	91,5
mach 17	120	700	580	522	58	90
mach 18	120	690	570	539	31	94,56
mach 19	200	662	462	425	37	91,99
					Média	93,2555

Tabela B.14: Simulação do cenário 1 com n° teórico de postos necessários - Heurística 2

Makespan	960					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	30	480	450	450	0	100
mach 1	50	530	480	480	0	100
mach 2	130	740	610	520	90	85,25
mach 3	40	706	666	455	211	68,32
mach 4	0	415	415	415	0	100
mach 5	70	830	760	630	130	82,89
mach 6	150	840	690	480	210	69,57
mach 7	90	700	610	500	110	81,97
mach 8	40	613	573	515	58	89,88
mach 9	0	410	410	410	0	100
mach 10	80	740	660	520	140	78,79
mach 11	130	750	620	495	125	79,84
mach 12	370	927	557	485	72	87,07
mach 13	30	575	545	545	0	100
mach 14	0	400	400	400	0	100
mach 15	70	643	573	480	93	83,77
mach 16	400	960	560	540	20	96,43
mach 17	100	760	660	545	115	82,58
mach 18	260	570	310	310	0	100
mach 19	0	410	410	410	0	100
					Média	89,318

Tabela B.15: Simulação do cenário 1 - Operadores e máquinas totalmente polivalentes

Makespan	306					
	inicio	fim	total	trabalho	parada	taxa
mach 0	0	291	291	291	0	100
mach 1	0	290	290	290	0	100
mach 2	0	286	286	286	0	100
mach 3	0	286	286	286	0	100
mach 4	0	292	292	292	0	100
mach 5	0	303	303	303	0	100
mach 6	0	286	286	286	0	100
mach 7	0	291	291	291	0	100
mach 8	0	306	306	306	0	100
mach 9	0	293	293	293	0	100
mach 10	0	283	283	283	0	100
mach 11	0	283	283	283	0	100
mach 12	0	294	294	294	0	100
mach 13	0	282	282	282	0	100
mach 14	0	280	280	280	0	100
mach 15	0	279	279	279	0	100
mach 16	0	286	286	286	0	100
mach 17	0	294	294	294	0	100
mach 18	0	301	301	301	0	100
mach 19	0	284	284	284	0	100
mach 20	0	284	284	284	0	100
mach 21	0	284	284	284	0	100
mach 22	0	297	297	297	0	100
mach 23	0	291	291	291	0	100
mach 24	0	274	274	274	0	100
mach 25	0	283	283	283	0	100
mach 26	0	306	306	306	0	100
mach 27	0	292	292	292	0	100
mach 28	0	305	305	305	0	100
mach 29	0	305	305	305	0	100
mach 30	0	291	291	291	0	100
mach 31	0	305	305	305	0	100
mach 32	0	278	278	278	0	100
					Média	100

Referências

- [1] Richard B. Chase e Nicholas J. Aquilano. *Production and operations management : a life cycle approach*. Irwin, Homewood, IL :, 5th ed. edição, 1989.
- [2] Assembly line balancing. <http://www.assembly-line-balancing.de/> (visitado em 31/01/2011).
- [3] Ormeu Coelho da Silva, Gilberto de Miranda, e Samuel Vieira Conceio. Reconfigurao dinamica de linhas de montagem. *Pesquisa Operacional*, 30:237 – 258, 04 2010.
- [4] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. Assembly line balancing: Which model to use when?, 2006.
- [5] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2):674–693, December 2007.
- [6] Armin Scholl e Christian Becker. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3):666–693, February 2006.
- [7] Armin Scholl e Stefan Voß. Simple assembly line balancing—heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2:217–244, 1997. 10.1007/BF00127358.
- [8] Christian Becker e Armin Scholl. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3):694–715, February 2006.
- [9] Merengo C. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37:2835–2860(26), 15 August 1999.
- [10] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. Jena Research Papers in Business and Economics - Working and Discussion Papers 02/2007, Friedrich-Schiller-University Jena, School of Economics and Business Administration, 2007.
- [11] Thomopoulos N.T. Mixed model line balancing with smoothed station assignment. *Management Science*.
- [12] Patrick R. McMullen e Gregory V. Frazier. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51(3):177–190, September 1997.

- [13] Armin Scholl. Balancing and sequencing of assembly lines. Publications of Darmstadt Technical University, Institute for Business Studies (BWL) 10881, Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL), Janeiro 1999.
- [14] M P Gerhardt, F S Fogliatto, e M N Cortimiglia. Metodologia para o balanceamento de linhas de montagem multi-modelo em ambientes de customização em massa. *Gestão Produção*, 14(2):267–279, 2007.
- [15] Vilarinho P. M. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40:1405–1420(16), 15 April 2002.
- [16] Ana Sofia Simaria e Pedro M. Vilarinho. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type ii. *Comput. Ind. Eng.*, 47:391–407, December 2004.
- [17] Ana S. Simaria e Pedro M. Vilarinho. 2-antbal: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines. *Comput. Ind. Eng.*, 56:489–506, March 2009.
- [18] Yeo Keun Kim, Jae Yun Kim, e Yeongho Kim. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence*, 13:247–258, November 2000.
- [19] Zhenxin Cao e Shiping Ma. Balancing and sequencing optimization of the mixed model assembly lines. Em *Proceedings of the 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology - Volume 01*, páginas 732–736, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [20] S. S. Panwalkar e Wafik Iskander. A Survey of Scheduling Rules. *Operations Research*, 25(1):45–61, 1977.